

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO</p>	<p>FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0</p>
--	---	---



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES
SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS, AL IMPLEMENTAR RELLENOS
GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO**

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2020

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

**ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES
SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS, AL IMPLEMENTAR RELLENOS
GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO**

PRESENTADO POR:

MARIA CAMILA JIMENEZ VARÓN	CÓDIGO: 505794
GUSTAVO ADOLFO OTÁLVARO GAVIRIA	CÓDIGO: 504722

DIRECTOR:

INGENIERA LAURA MARIA ESPINOSA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2020

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--



La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)
 Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
 hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

NOTA DE ACEPTACIÓN:

**FIRMA DEL PRESIDENTE DEL
JURADO**

FIRMA JURADO

FIRMA JURADO

BOGOTÁ D.C, MAYO 15 DE 2020

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

DEDICATORIA

Dedico de manera especial este trabajo primero a Dios, por permitirme llegar hasta este momento de mi vida.

A mi madre Deissy, por darme su amor, apoyo y comprensión incondicional durante toda mi carrera, pues ella fue el primer y principal cimiento para la construcción de mi vida personal y profesional, sin su sacrificio, esfuerzo y motivación no hubiese sido posible cumplir mi sueño.

A mi hermana Jasbleidy, por ser mi ejemplo, pues me enseñó que con el trabajo, perseverancia y dedicación se encuentra el éxito profesional, ella sentó en mí las bases de responsabilidad y deseos de superación.

Por otro lado, a mi compañero de tesis Gustavo, por ser una persona incondicional, por darme apoyo y ánimo en cada momento, gracias por no rendirse y sacar adelante nuestro proyecto y nuestra carrera.

A mis maestros por su apoyo, paciencia, colaboración y conocimiento para lograr culminar este proyecto investigativo.

Autor: María Camila Jiménez Varón

Dedico este trabajo, primero a Dios por concederme la oportunidad de crecer como persona y como ingeniero, para así poder ayudar a las personas de una manera ética y responsable.

Seguidamente a mis padres, Marina y Gustavo, por ser un apoyo incondicional en este proceso, por tenerme la paciencia, el cariño y el apoyo suficiente para sacar uno de los proyectos más difíciles para ellos, y poder así convertirme en ingeniero. Prometo siempre enorgullecer su nombre frente a todos.

Por otro lado, a mis hermanos, Luz, Sandra y John, por ser mi ejemplo a seguir y siempre estar conmigo en las buenas y en las malas, sé que puedo contar con ustedes en cualquier momento de mi vida y quiero decirles que les tengo mucho cariño y respeto, los quiero. A mis sobrinos Juan y Santiago, porque son los hijos que puedo devolver, son mis más grandes amores, pienso cuidarlos y quererlos hasta el fin de mis días.

A mis amigos de infancia, José y Sergio, por siempre brindarme su aliento y apoyo para empezar y finalizar todos los proyectos que nos proponemos, sé que puedo contar con ustedes para cualquier circunstancia de la vida.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

A mi compañera de tesis María Camila, por tantos momentos que compartimos juntos, por tantas risas, enojos, problemas resueltos y por el hecho de sacar este trabajo investigativo adelante juntos.

A mi novia Luisa, por brindarme todo su cariño, comprensión y ternura, por darme el apoyo de no desfallecer en los momentos difíciles, por estar siempre conmigo y apoyar toda idea que se me ocurra. Gracias por estar en mi vida.

Finalmente, a todos los maestros, que compartir su conocimiento y experiencia en el campo de la ingeniería, porque gracias a ustedes este sueño de ser ingeniero está finalizando, espero encontrarlos en la vida profesional y así adquirir mucho más conocimiento.

Autor: *Gustavo Adolfo Otálvaro Gaviria*

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, por guiarme y bendecirme a lo largo de mi carrera dándome fortaleza para afrontar todas aquellas dificultades que se me presentaron.

Doy mi más profundo agradecimiento a mi madre Deissy Varón y a mi hermana Jasbleidy Jiménez, quienes me enseñaron los valores y la ética con la que cuento hoy en día, es por ellas que logre culminar mis estudios con su confianza y apoyo. Y finalmente a todas aquellas personas que nos aportaron sus conocimientos, quienes nos dieron una voz de aliento en los momentos difíciles, a nuestros maestros por su disposición para trabajar con nosotros.

Autor: María Camila Jiménez Varón

Gracias a Dios, por darme la oportunidad, capacidad y bendición de lograr este objetivo de ser ingeniero, por darme la fuerza necesaria para sobrellevar las dificultades y poder sacar todos los proyectos adelante.

De igual manera agradezco de todo corazón a mis padres Marina Gaviria y Gustavo Otálvaro, por darme todo para cumplir este sueño, por ser mis ejemplos a seguir y ser mis modelos de cómo ser una mejor persona en la vida.

A mis hermanos Luz Otálvaro, Sandra Otálvaro y John Otálvaro, por darme su amor y apoyo para seguir adelante en la vida.

Finalmente, a toda persona que en algún momento me ayudó en este proceso, con su conocimiento, o con su apoyo para que así este objetivo finalizara de una manera idónea.

Autor: Gustavo Adolfo Otálvaro Gaviria

Queremos agradecer especialmente al ingeniero David Bernal, por brindarnos todo el apoyo, conocimiento y confianza, por darnos la idea de ejecutar este proyecto, a los ingenieros Laura Espinosa y Juan Bastidas por estar al tanto del desarrollo del mismo, por ayudarnos en todas las dificultades y por siempre estar pendiente de nosotros

Autor: María Camila Jiménez Varón, Gustavo Adolfo Otálvaro Gaviria

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

RESUMEN

El empleo de rellenos granulares como método de mejoramiento en suelos de baja capacidad portante es ampliamente difundido en las practicas constructivas de cimentaciones superficiales. Sin embargo, el cálculo de su carga ultima y admisible plantea un problema de suelos estratificados, el cual puede ser ignorado, especialmente en construcciones de menor relevancia. En el presente estudio se realiza un análisis comparativo de la capacidad de carga de suelos estratificados, suelo rígido sobre suelo blando, mediante dos metodologías de cálculo: método analítico tradicional o teoría de Meyerhof y el análisis numérico mediante elementos finitos empleando el programa OPUM G2. El suelo natural de estudio es una arcilla blanda procedente de la localidad de Suba en Bogotá, Colombia y los materiales de remplazo propuestos son recebo y subbase tipo C acordes a la normatividad INVIAS. Los resultados sugieren que el remplazo parcial del suelo natural con rellenos granulares incrementa la capacidad portante del suelo en forma proporcional con el espesor del remplazo, siendo la subbase la mejor opción de relleno a emplear. Por último, el análisis mediante elementos finitos genera resultados de capacidad portante más conservadores que la teoría de Meyerhof, esto debido a que el primer método considera diversas condiciones de contorno las cuales son idealizadas como medio infinito en los métodos analíticos de cálculo.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. GENERALIDADES	17
1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	17
1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.2.1. Descripción del problema	18
1.2.2. Formulación del problema	20
2. OBJETIVOS	21
2.1. OBJETIVO GENERAL	21
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3. DELIMITACIONES	22
3.1. ESPACIO	22
3.2. TIEMPO	22
3.3. CONTENIDO	22
3.4. ALCANCE	22
4. LIMITACIONES	23
4.1. VARIABLES	23
4.2. CONSTANTES	23
5. MARCO DE REFERENCIA	24
5.1. MARCO TEÓRICO	24
5.1.1. Sistema de clasificación de los suelos	24
5.1.2. Tipos de mejoramiento del suelo	25
5.1.3. material granular	27
5.1.4. cimentaciones	28
5.1.5. método de Mohr-Coulomb	30
5.1.6. teorías convencionales	31
5.1.7. tipos de carga	33
5.1.8. tipos de falla	36
5.1.9. optum G2	39
5.2. MARCO LEGAL	42
5.3. ESTADO DEL ARTE	43
6. METODOLOGÍA	45
6.1. MATRIZ DEL MATERIAL DE REEMPLAZO	45
6.2. PASO A PASO PARA LA CREACIÓN DE MODELACIONES POR EL PROGRAMA OPTUM G2	46
7. PARÁMETROS UTILIZADOS	59
7.1. SUELO NATURAL	59
7.2. MATERIAL RECEBO	60
7.3. MATERIAL SUB BASE	61
8. RESULTADOS Y ANÁLISIS	62

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

8.1. CAPACIDAD DE CARGA ULTIMA DEL SUELO SEGÚN LA TEORIA DE MEYERHOF	62
8.1.1. Capacidad portante del suelo estratificado con el uso de diferentes tipos de relleno granular	62
8.1.2. Incremento de la capacidad portante del suelo natural debido a los rellenos granulares.	63
8.2. CAPACIDAD DE CARGA ULTIMA Y ADMISIBLE DEL SUELO SEGÚN ANALISIS POR METODO NUMERICO.	65
8.3. COMPARACIÓN DE LA TEORÍA DE MEYERHOF Y MODELACIONES NUMÉRICAS	66
8.3.1. Sub-base tipo C	66
8.3.2. Recebo	68
8.4. INFLUENCIA DEL TIPO DE MATERIAL DE REEMPLAZO EN LA CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO MEDIANTE MODELACIONES NUMERICAS POR ELEMENTOS FINITOS	70
8.5. INFLUENCIA DEL AREA DEL MEJORAMIENTO EN LA CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO MEDIANTE MODELACIONES NUMERICAS CON ELEMENTOS FINITOS	74
8.6. DESPLAZAMIENTO DEL SUELO POR MEDIO DE LAS MODELACIONES	77
CONCLUSIONES	79
RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXOS	83

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación AASHTO	25
Tabla 2 Requisitos para material de recebo	27
Tabla 3 Requisitos de los agregados para sub-base granular	28
Tabla 4 Parámetros físicos de suelos estratificados	33
Tabla 5 Factores de capacidad de carga de Meyerhof	35
Tabla 6 Humedad del terreno natural	59
Tabla 7 Cohesión y ángulo de fricción del terreno natural	60
Tabla 8 Parámetros de recebo	60
Tabla 9 Granulometría del recebo fracción gruesa	61
Tabla 10 Granulometría del recebo fracción fina	61
Tabla 11 Parámetros de sub-base tipo C	61
TABLA 12 RESULTADOS DE CARGA ULTIMA	62
Tabla 13 Comprobación condición material recebo	63
Tabla 14 Comprobación condición material sub-base	63
Tabla 15 Incremento de la capacidad de carga en el material natural con recebo	64
Tabla 16 Ganancia capacidad de carga en el material natural con sub-base	64
Tabla 17 Resultados de carga admisible del suelo natural	65
Tabla 18 Comparación de valores para sub-base tipo C	67
Tabla 19 Comparación de valores para recebo	68

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Arcillas blandas presentes en la zona de Lisboa, localidad de Suba, Bogotá	19
Ilustración 2 Modelo zapata cuadrada	29
Ilustración 3 Falla de la capacidad de carga en un suelo bajo una cimentación continua rígida en grava	32
Ilustración 4 Falla en el estrato superior	37
<i>Ilustración 5 Falla de punzonamiento</i>	38
Ilustración 6 Relación coeficiente de punzonamiento y ángulo de fricción	39
Ilustración 7 División de elementos.....	41
Ilustración 8 Matriz zapata VS espesor de material de mejoramiento	46
Ilustración 9 Programa Optum G2	47
Ilustración 10 Plantilla inicial del programa	47
Ilustración 11 Barra de configuraciones.....	48
Ilustración 12 Barra de aplicaciones del programa	48
Ilustración 13 Selección de geometría del terreno	49
Ilustración 14 Medidas por coordenadas	49
Ilustración 15 Valores del terreno por coordenadas.....	50
Ilustración 16 Dimensionamiento del suelo natural y de reemplazo	50
Ilustración 17 Clasificación del terreno a emplear.....	51
Ilustración 18 Eliminación de materiales precargados	51
Ilustración 19 Selección tipo de materiales.....	51
Ilustración 20 Barra de herramientas para la clasificación del material	52
Ilustración 21 Listado de materiales.....	52
Ilustración 22 Aplicación de material a las dimensiones del terreno	53
Ilustración 23 Métodos de carga	53
Ilustración 24 Aplicación de carga distribuida	54
Ilustración 25 Carga distribuida en el terreno de reemplazo	54
Ilustración 26 Configuración de la carga.....	55
Ilustración 27 Configuración de elementos	56
Ilustración 28 Análisis inferior y superior de las capas.....	57
Ilustración 29 Resultado final de falla	58
Ilustración 30 Comparación de la carga admisible entre el suelo natural y las modelaciones.....	66
Ilustración 31 Comparación de Meyerhof y modelaciones numéricas para sub-base tipo C con base 1,00B.	67
Ilustración 32 Comparación de Meyerhof y modelación numéricas para el recebo con base 1,00B.....	69
Ilustración 33 Comparación de los materiales según la base de mejoramiento 1.00B	71

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Ilustración 34 Comparación de los materiales según la base de mejoramiento	
1.50B	71
Ilustración 35 Comparación de los materiales según la base de mejoramiento	
2.00B	72
Ilustración 36 Comparación de los materiales según la base de mejoramiento	
2.50B	72
Ilustración 37 Comparación de los materiales según la base de mejoramiento	
3.00B	73
Ilustración 38 Comparación de los materiales según la base de mejoramiento	
3.50B	73
Ilustración 39 Espesor 0.25m.....	74
Ilustración 40 Espesor 0.50m.....	75
Ilustración 41 Espesor 0.75m.....	75
Ilustración 42 Espesor 1.00m.....	76
Ilustración 43 Comportamiento de falla del recebo (3.50B * 1.00)	77
Ilustración 44 Comportamiento de falla de la sub-base (2.50B *1.00)	78

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

TABLA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Teoría general esfuerzo cortante	30
Ecuación 2 Criterio de falla de Mohr - Coulomb	30
Ecuación 3 Carga ultima	34
Ecuación 4 Condición de carga ultima	34
Ecuación 5 Carga ultima del suelo inferior.....	34
Ecuación 6 Carga ultima del suelo superior.....	34
Ecuación 7 Capacidad carga admisible	36
Ecuación 8 Coeficiente de punzonamiento	38
Ecuación 9 Carga del suelo de mejoramiento	38
Ecuación 10 Carga del suelo natural	38

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

INTRODUCCIÓN

La técnica de rellenos granulares es una técnica ampliamente difundida en la práctica constructiva, la cual busca mejorar la capacidad portante de suelos empleados en fundaciones superficiales y reducir los riesgos de asentamiento. Sin embargo, la definición de los parámetros del relleno tales como espesor, área de intervención y tipo de material, se realiza en algunas ocasiones de forma empírica o de acuerdo a las buenas practica constructivas. Lo anterior conlleva a la ejecución de trabajos que carecen de soporte técnico en cuanto a la efectividad de los diseños adoptados y su grado de optimización. A pesar de que estos rellenos empíricos contribuyan positivamente en el incremento de las capacidades portantes del suelo de fundación, estos pueden estar sobredimensionados, generando movimientos de tierra, o en el peor de los casos se puede realizar rellenos de capacidad insuficiente para las cargas a las cuales se impondrá el suelo.

En el caso particular de Bogotá, Colombia, el diseño de rellenos granulares basado en las propiedades geotécnicas específicas de los suelos de interés y su interacción es de especial importancia, debido a la gran variedad geológica y por tanto gran diversidad de suelos de propiedades diferentes, que se pueden presentar en pequeñas áreas geográficas, como es el caso de Bogotá. A esto se le debe sumar la presencia de suelos estratificados presentes en el territorio mencionado.

Lo anterior, se evidencia en el estudio geológico realizados por la alcaldía de Bogotá, "zonificación respuesta sísmica" (Díaz, Ordoñez, Rodríguez, & Beltrán, Octubre 2010), en el cual se establece que en sectores como la localidad de Suba-Bogotá cuenta con arcillas limosas muy blandas, arcillas limosas blandas y arcillas arenosas firmes. Es decir, "suelos de muy baja a media capacidad portante y muy compresibles".

En este contexto, es relevante realizar una evaluación técnica sobre la efectividad y parámetros de diseño óptimos en el uso de suelos granulares como reemplazo del material de suelo blando existente.

Diferentes metodologías analíticas se encuentran disponibles a la fecha para la evaluación de la capacidad portante de los suelos estratificados. Dentro de ellas se destacan el método de Meyerhof & Hanna y los análisis numéricos mediante elementos finitos. En el presente documento se busca realizar un estudio comparativo de estas dos técnicas de cálculo de capacidad portante, aplicada en el mejoramiento de suelos blandos mediante rellenos granulares. Igualmente se explorarán alternativas de optimización de los rellenos granulares a fin de reducir los volúmenes rellenos a los mínimos necesarios, dando cumplimiento a los

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

parámetros de capacidad ultima, límites de servicio y factores de seguridad aplicables a la normatividad colombiana.

Para el desarrollo de los objetivos planteados se empleará un suelo natural caracterizado como arcilla de baja capacidad portante procedente de la localidad de Suba en Bogotá, Colombia. Como relleno granular se plantean dos tipos de materiales: recebo tipo INVIAS y sub-base tipo C. Por otra parte, el modelamiento mediante elementos finitos se realizará con el programa Optum G2, en el cual se modelará el relleno granular bajo diferentes configuraciones geométricas variando anchos y espesores, a fin de obtener el dimensionamiento optimo que provea el mayor incremento en la capacidad de soporte, con el menor volumen de remplazo posible.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Una gran cantidad de edificaciones proyectadas con fundaciones superficiales en Bogotá requieren de algún tipo de estrategia de mejoramiento de suelos, debido a la gran cantidad de arcillas blandas presentes en el territorio. (Freire Tellado & Perez Valcarcel, 2014), define el mejoramiento de suelo como “la mejora del terreno incrementando sus propiedades resistentes o de rigidez, para apoyar adecuadamente cimentaciones o construcciones civiles”. Dentro de las múltiples alternativas de mejoramiento de suelos, el remplazo de suelos naturales con bajas capacidades de soporte (ej. arcillas blandas) por materiales granulares importados o manufacturados (ej. recibos o sub-bases) con mejores capacidades de soporte es ampliamente extendido en las practicas constructivas. Sin embargo, en proyectos habitacionales de tipo familiar, el cálculo adecuado de dichos rellenos es obviado, dada la necesidad de conocimientos geotécnicos para su correcto diseño.

El emplazamiento de una capa de material rígido sobre la arcilla blanda como soporte de fundación plantea un problema de cálculo de capacidad portante en suelos estratificados, el cual ha representado grandes retos para ingenieros geotecnistas en las últimas décadas. Las metodologías de cálculo han evolucionado a partir de los métodos analíticos clásicos, pasando por cálculos numéricos mediante métodos de elementos finitos, hasta los más recientes modelos basados en redes neuronales artificiales (Shoaei et al. 2012). Dada la complejidad de los suelos, cada método genera aportes significativos en la estimación de la capacidad portante de los suelos, por tanto, las diferentes alternativas son aplicables según la relevancia de los proyectos.

Gran cantidad de literatura ha sido desarrollada en el campo de los métodos analíticos clásicos, empezando por (Meyerhof 1974) con la estimación de la capacidad portante de cimientos en arenas con estrato de arcilla subyacente. Posteriormente (Hanna and Meyerhof 1980) propusieron diagramas para el cálculo de fundaciones soportadas en arenas densas con un estrato subyacente de arcilla blanda, el cual es el caso particular del presente estudio. Estudios adicionales arenas subyacentes por arcilla blanda fueron realizados por (Hanna 1982) en el cual se estudia la influencia del factor H/B , espesor del suelo granular debajo de la fundación (H), con respecto a la longitud de su base (B), al igual que D/B , longitud de empotramiento de la fundación, respecto a la longitud de la base. El incremento de estas relaciones aumenta la capacidad portante del suelo. Sin embargo, los modelos propuestos consideran que los diferentes estratos de suelos son infinitos en área.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

La introducción de técnicas informáticas y el uso de modelos numéricos (ej. Método de elementos finitos) ha facilitado los análisis geotécnicos. (Hanna 1987) formulo e implemento un modelo de elementos finitos para el análisis de la capacidad portante de suelos estratificados compuestos por dos capas de arena suelta y densa. Los resultados del modelo propuesto fueron muy cercanos a los valores experimentales con ligeras diferencias cuando H/B supera el valor de 4.5. Múltiples modelaciones con elementos finitos han sido realizadas desde entonces, evaluando diferentes factores que pueden influenciar la capacidad de los suelos (ej. Forma de la fundación, Rugosidad entre fundación y suelo, factores de capacidad -N entre otros) (Shoaei et al. 2012). A pesar de la efectividad de los modelos propuestos, todos estos consideran los estratos como un medio continuo e infinito, al igual que los modelos analíticos tradicionales.

El anterior contexto, abre la posibilidad de estudio en rellenos granulares que se emplean de forma localizada. Este tipo de relleno, que reemplaza suelos de baja capacidad portante, se puede emplear estrictamente bajo la fundación y en caso de ser insuficiente, su área puede ser extendida en función del ancho de la fundación. Dicha aproximación al problema de la capacidad portante de suelos estratificados rompe el esquema de un medio continuo, el cual puede generar optimización en los movimientos de tierras. La anterior propuesta puede ser analizada mediante modelos de elementos finitos y ser comparado con las técnicas analíticas que consideran el suelo como un continuo. A partir de esto, comparaciones pueden ser establecidas y validar si el empleo localizado de rellenos puede ser una alternativa eficiente en el diseño de fundaciones.

1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Descripción del problema

En la localidad de suba Bogotá, específicamente en el barrio Lisboa, se presentan suelos de diferentes características geotécnicas, en su mayoría arcillas blandas de baja capacidad de carga admisible. Como se observa en la “ilustración 1”

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Ilustración 1 Arcillas blandas presentes en la zona de Lisboa, localidad de Suba, Bogotá



Fuente: Elaboración propia

Dadas sus características, estos suelos son de poca utilidad al ser empleados como base de cimentaciones de proyectos tales como edificaciones. Por tal motivo, un gran número de construcciones realiza el retiro total o parcial de la capa de suelo de baja calidad hasta alcanzar estratos de mayor rigidez. Posteriormente, el material retirado debe ser remplazado con materiales de altas características mecánicas tales como los sugeridos por el instituto nacional de vías:

- I.N.V.E-122: Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo – agregado.
- I.N.V.E 123: Análisis granulométrico de suelos por tamizado
- I.N.V.E 125: Determinación del límite líquido de los suelos.
- I.N.V.E 126: Límite plástico e índice de plasticidad
- I.N.V.E 128: Determinación de la gravedad específica de los suelos y de la llenante mineral.
- I.N.V.E 133: Equivalente de arena de suelos y agregados finos.
- I.N.V.E 141: Relación de peso unitario – humedad en los suelos equipo normal

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

- I.N.V.E 148: Relación de soporte del suelo en el laboratorio (TBR del laboratorio)
- I.N.V.E 154: Determinación de la resistencia al corte método de corte directo (CD) (Consolidado drenado).

Teniendo en cuenta que dicho tipo de materiales no se encuentran naturalmente en la zona de análisis del proyecto, el material de remplazo debe ser importado, como es el caso de los recibos tipo INVIAS y subbase tipo C. La anterior estrategia es de común aplicación en edificaciones de 3 o 4 pisos.

Los rellenos granulares realizados como soporte de fundaciones deben ser diseñados con adecuadas bases en ingeniería geotécnica, sin embargo, estos diseños no se realizan en muchas ocasiones, dejando el dimensionamiento de estos a las practicas constructivas populares o conocimientos empíricos sin soporte técnico. Adicionalmente, los rellenos son usualmente realizados en toda el área de la edificación, a pesar de que dichos rellenos podrían ser optimizados en área y profundidad.

La aplicación de las diferentes teorías para el cálculo de la capacidad portante en suelos estratificados tales como métodos analíticos tradicionales o métodos de elementos finitos pueden dar solución al problema planteado, sin embargo, es de resaltar y como se ha mencionado anteriormente, dichas teorías consideran los diferentes estratos de suelos como medios continuos infinitos.

1.2.2. Formulación del problema

En la presente investigación se busca realizar el cálculo de capacidad portante del suelo natural (arcilla blanda) y establecer el incremento de capacidad que se puede lograr bajo diferentes configuraciones geométricas de rellenos granulares, como lo son el recebo tipo INVIAS y sub-base tipo C.

Adicionalmente, se busca realizar un comparativo en la estimación de la capacidad de soporte del suelo mediante dos métodos diferentes: primero el método analítico tradicional desarrollado por Meyerhof & Hanna y segundo el análisis de elementos finitos empleando la herramienta tecnológica Optum G2.

Finalmente se plantea el cálculo de la capacidad de soporte para los dos tipos de relleno granular mencionados y en diferentes configuraciones geométricas. Con esto se busca establecer comparativos que conduzcan a la optimización de los volúmenes de suelo a remplazar por el relleno granular.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el incremento en la capacidad portante del suelo al emplear dos tipos de rellenos granulares y diferentes configuraciones geométricas del relleno, a fin soportar fundaciones superficiales. Igualmente, se busca realizar un comparativo entre diferentes metodologías de cálculo de capacidad portante del suelo, como lo son la teoría analítica de Meyerhof y las modelaciones numéricas por elementos finitos, a través del programa OPTUM G2.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la capacidad de carga del suelo natural y de diferentes configuraciones de rellenos granulares realizados con recebo y subbase, mediante el método analítico de Meyerhof.
- Realizar el cálculo de capacidad portante del suelo natural y de diferentes configuraciones de rellenos granulares mediante análisis numérico por elementos finitos, empleando el programa OPTUM G2
- Evaluar la influencia del espesor de relleno granular y de su ancho en la capacidad de carga del suelo para cimentaciones superficiales.
- Comparar las diferentes metodologías de cálculo de capacidad portante estudiadas: método analítico de Meyerhof y elementos finitos.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

3. DELIMITACIONES

Para la definición de las delimitaciones del presente trabajo de investigación se presenta a continuación el espacio, tiempo, contenido y alcance que hacen parte del proyecto:

3.1. ESPACIO

- Salas de computación de la Universidad Católica de Colombia.
- Biblioteca de la Universidad Católica de Colombia.
- Obras en construcción y edificaciones ubicadas en el barrio Lisboa en la localidad de Suba, Bogotá.

3.2. TIEMPO

El desarrollo del proyecto se llevará a cabo del 29 de julio del 2019 al 15 de mayo del 2020.

3.3. CONTENIDO

Informe de trabajo de Grado, Estudio comparativo del comportamiento de cimentaciones superficiales en suelos blandos al implementar rellenos granulares como técnica de mejoramiento

3.4. ALCANCE

El alcance del presente investigativo está limitado a las siguientes actividades:

- Cálculo de capacidad portante del suelo natural de la zona mediante el método analítico propuesto por Meyerhof & Hanna
- Se trabajará con los materiales de sub-base granular tipo C y recebo según la normatividad INVIAS, cuyas propiedades mecánicas tales como la cohesión, ángulo de fricción y pesos específicos han sido obtenidas a partir de un análisis bibliográfico realizado durante el periodo 2019-2020.
- Los diseños realizados para la determinación del espesor y ancho serán únicamente ejecutados por el programa Optum G2, mediante el análisis de elementos Lower y Upper.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

4. LIMITACIONES

Para la definición de las limitaciones del presente trabajo investigativo se presenta a continuación las diferentes variables y constantes que hacen parte del proyecto:

4.1. VARIABLES

- Altura y base (espesor y ancho del material reemplazado)
- El módulo de elasticidad del material in-situ y material de reemplazo.
- Caracterización del material in-situ.
- Determinación de la carga aplicada por el programa.

4.2. CONSTANTES

- la zapata a emplear será cuadrada.
- Material de mejoramiento (recebo y sub-base tipo C).
- La limitación del programa al ser una versión gratuita. Debido a que solo permite la interacción de 2 tipos de material en el diseño, sin embargo, se puede realizar las respectivas modelaciones debido a que esta investigación solo necesita 2 materiales actuantes y la carga es aplicada sobre el material de mejoramiento.
- Alto costo de los ensayos de laboratorio en entidades externas a la Universidad católica de Colombia, al igual que una baja disponibilidad o carencia de equipo y personal necesarios en ensayos tales como corte directo o falla triaxial. Por tal motivo, no fue posible realizar la caracterización mecánica de los suelos empleados en el presente estudio. Las propiedades mecánicas de dichos materiales fueron adoptadas de fuentes bibliográficas.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

5. MARCO DE REFERENCIA

A continuación, se muestran el marco teórico, legal y estado del arte sobre los cuales se desarrolla el proyecto.

Para determinar la carga admisible que tendrá el material de mejoramiento se analizará por la teoría de Meyerhof & Hanna, bajo el criterio de falla de Mohr-Coulomb.

5.1. MARCO TEÓRICO

5.1.1. Sistema de clasificación de los suelos

“Los sistemas de clasificación de los suelos dividen los suelos en grupos y subgrupos con base en propiedades ingenieriles comunes como la distribución granulométrica, el límite líquido y el límite plástico”. (DAS, 2015)

“Para la clasificación de los suelos se utiliza principalmente la clasificación AASHTO (American association highway and transportation officials). Este sistema presenta una clasificación de 8 grupos principales empezando en A-1 y finalizando en A-8 con base en su distribución granulometría, límite líquido e índice de plasticidad.

Los suelos en los grupos (A-1; A-2 y A-3) son materiales de grano grueso, los grupos (A-4; A-5; A-6 y A-7) son materiales de grano fino y el grupo (A-8) se define como los materiales orgánicos y se identifican mediante una inspección visual”. Como se evidencia en la “tabla 1”.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Tabla 1 Clasificación AASHTO

CLASIFICACION GENERAL	Materiales Granulares (igual o menor del 35% pasa el tamiz N° 200)							Materiales Limo - Arcillosos (más del 35% que pasa el tamiz N° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
SUB - GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
% que pasa el Tamiz:											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características del Material que pasa el tamiz N° 40											
Límite Líquido			NO PLÁSTICO	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 máx.
Índice de Plasticidad	6máx	6 máx.		10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Tipos de Material	fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava, arenas limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Terreno de Fundación	Excelente a Bueno						Regular a Deficiente				
NOTA: El índice de plasticidad de los suelos A-7-5 es igual o menor que su Límite Líquido 30, el de los A-7-6 mayor que su Límite Líquido (fig. 1) se halla indicada la relación ente lo LL e IP de los materiales finos. Dicho de otro modo, el grupo A-7 es subdividido en A-7-5 ó A-7-6 dependiendo del Límite Plástico (L.P.) Si el LP ≥ 30, la clasificación es A-7-6 Si el LP < 30, la clasificación es A-7-5											

Fuente: (DAS, 2015)

5.1.2. Tipos de mejoramiento del suelo

Existen diferentes técnicas de mejoramiento de suelo, las cuales son aplicadas en las practicas constructivas convencionales. Estas buscan incrementar la capacidad de carga admisible del suelo. Luego de una inspección visual y bajo una evaluación de las propiedades geotécnicas del suelo natural de fundación, es posible realizar la selección del procedimiento de mejora de terreno más adecuado para cada caso específico. A continuación, se describe los procedimientos de mejora de suelos más comunes:

- Remplazo total o parcial de suelos natural por rellenos granulares compactados

Este procedimiento consiste en la sustitución o cambio parcial del terreno natural por un “suelo de préstamo adecuado” con mejores propiedades de resistencia. La colocación de este material se realiza en capas, las cuales deben ser compactadas en su humedad optima, hasta alcanzar la máxima densidad seca. Este último parámetro se debe verificar en cada capa colocada comparando los resultados con el ensayo Proctor de suelo de remplazo. (Freire Tellado & Perez Valcarcel, 2014)

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

- Precarga y drenaje

La precarga y drenaje son basadas en la teoría de consolidación, la cual estudia la reducción del índice de vacíos del suelo ante cargas impuestas durante ciertos periodos de tiempo. Mediante esta técnica se busca reducir la compresibilidad del suelo e incrementar el esfuerzo efectivo presente del suelo. (Freire Tellado & Perez Valcarcel, 2014)

- Columnas de grava

Las columnas de grava consisten en la “sustitución del terreno por columnas de grava”, este método se aplica para “suelos mixtos granulares o cohesivos como limos arenosos y no arenosos y suelos de grano fino adecuado para cargas ligeras”. (Freire Tellado & Perez Valcarcel, 2014)

- Vibro compactación

El método de vibro compactación es el uso de “vibradores específicos de baja frecuencia colgados de grúas, para su ejecución se suele utilizar agua a presión para facilitar el hincado, este método es ideal para grandes cargas sobre los suelos mejorados y también para cargas dinámicas, para este método no es necesario la sustitución del terreno”, este método es empleado en “suelos sin cohesión o poco cohesivos como las arenas y gravas”. (Freire Tellado & Perez Valcarcel, 2014)

- Jet grouting

Esta técnica “consiste en la formación de columnas pseudeocilíndricas de suelo-cemento con aditivos capaces de soportar tensiones de rotura, es la consolidación del terreno mediante la inyección de lechada de cemento a alta presión”. Esta técnica tiene múltiples aplicaciones “(mejora el terreno, impermeabilización, túneles, etc.) siendo el fluido de perforación también variable, (cemento, bentonita, mezclas químicas, etc.). (Freire Tellado & Perez Valcarcel, 2014)

- Inyecciones

“Las inyecciones generalmente consisten en un conjunto de operaciones necesarias para llenar huecos o fisuras no accesibles en el terreno. Su objeto fundamental es mejorar las características mecánicas del suelo (incremento de resistencia, disminución de la deformabilidad, etc.), así como la disminución de la permeabilidad. (Freire Tellado & Perez Valcarcel, 2014)

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

5.1.3. material granular

Para esta investigación se proponen 2 tipos de material granular de remplazo, la sub-base tipo c y el recebo, cada uno con diferentes características mecánicas.

Recebo

El recebo o afirmado es una mezcla de materiales granulares compuesta por piedra triturada, arena y material fino, una vez compactado sirve como base para instalar estructuras de concreto y asfalto. Existen diferentes calidades, donde varía el tamaño de las rocas que acompañan la arena. (CONSTRUSHOP, 2019)

En la “tabla 2”, se aprecian las diferentes características con las cuales debe contar un suelo para ser clasificado como recebo, de acuerdo con el INVIAS. Los diferentes tipos de recebo propuestos por el INVIAS cuentan con diferentes niveles de exigencia.

Tabla 2 Requisitos para material de recebo

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	REQUISITO	
Dureza (O)		Recebo tipo 1	Recebo tipo 2
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) - 500 revoluciones (%)	E-218	50	65
Limpieza (F)			
Límite líquido, máximo (%)	E-125	45	45
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	10	12
Contenido de materia orgánica, máximo (%)	E-121	1.0	1.0
Expansión en prueba CBR, máximo (%) <i>Nota 1</i>	E-148	2.0	2.0
Resistencia del material (F)			
CBR de laboratorio, mínimo (%) <i>(Nota 1)</i>	E-148	10	10
Expansión en prueba CBR, máximo (%) <i>Nota 1</i>	E-148	2.0	2.0

Fuente: (INVIAS, RECEBO, 2013)

Sub-base tipo C

Las características de los agregados pétreos que componen la sub base granular deben cumplir los requisitos mostrados en la “tabla 3”.

El INVIAS presentan diferentes tipos de sub-base los cuales cuentan con diferentes niveles de exigencia en cuanto a sus propiedades, de acuerdo a lo mostrado en la “tabla 3”.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Tabla 3 Requisitos de los agregados para sub-base granular

Ensayo		Norma de Ensayo	Clase de Subbase Granular			
			SBG_PEA	SBG_C	SBG_B	SBG_A
Dureza						
Desgaste Los Angeles	- En seco, 500 revoluciones, % máximo	INV E-218-07	50	45	40	40
Micro Deval, % máximo	- Agregado Grueso	INV E-238-07	NA	35	35	30
10% de finos	- Valor en seco, kN mínimo - Relación húmedo/seco, % mínimo	INV E-224-07	NA	40 65	50 70	60 75
Durabilidad						
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	- Sulfato de Magnesio	INV E-220-07	18	18	18	18
Limpieza						
Limite Líquido, % máximo		INV E-125-07	40	25	25	25
Índice de Plasticidad, % máximo		INV E-126-07	10	6	3	3
Equivalente de Arena, % mínimo (1)		INV E-133-07		18	18	20
Valor de Azul de Metileno, máximo		INV E-235-07		10	10	10
Terrones de arcilla y partículas deleznales, % máximo		INV E-211-07		2	2	2
Geometría de las Partículas						
Partículas Fracturadas Mecánicamente, % mínimo	- 1 cara - 2 caras	INV E-227-07	NA NA	NA NA	NA NA	50 30
Índice de Aplanamiento, % máximo (2)		INV E-230-07	NA	NA	NA	NA
Índice de Alargamiento, % máximo (3)		INV E-230-07	NA	NA	NA	NA
Angularidad del Agregado Fino, % mínimo (RO)		INV E-239-07	NA	NA	NA	NA
Capacidad de Soporte						
CBR, % mínimo - Referido al 95 % de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142 -07 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de Inmersión.		INV E-148-07	20	30	40	60

Fuente: (INVIAS, BASE GRANULAR, 2013)

5.1.4. cimentaciones

Las cimentaciones superficiales hacen referencia a una estructura que descansa sobre un terreno situado inmediatamente debajo de la misma. Las zapatas aisladas generalmente de planta rectangular constituyen la cimentación superficial más habitual para pilares o columnas, mientras que en las zapatas corridas o continuas se utilizan bajo muros. En algunos casos las estructuras se cimientan sobre placas o losas. (LAMBE, 2002)

Cimentación superficial

Las cimentaciones superficiales, directas o poco profundas se construyen sobre capas superficiales del suelo a poca profundidad (hasta 1,5 m), sin embargo, soportan las cargas estructurales, la profundidad de los cimientos es menor que su

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

ancho y se clasifican en: zapatas aisladas, corridas, combinadas de esquina, losas y emparrillados. (Web, 2020)

- Losas

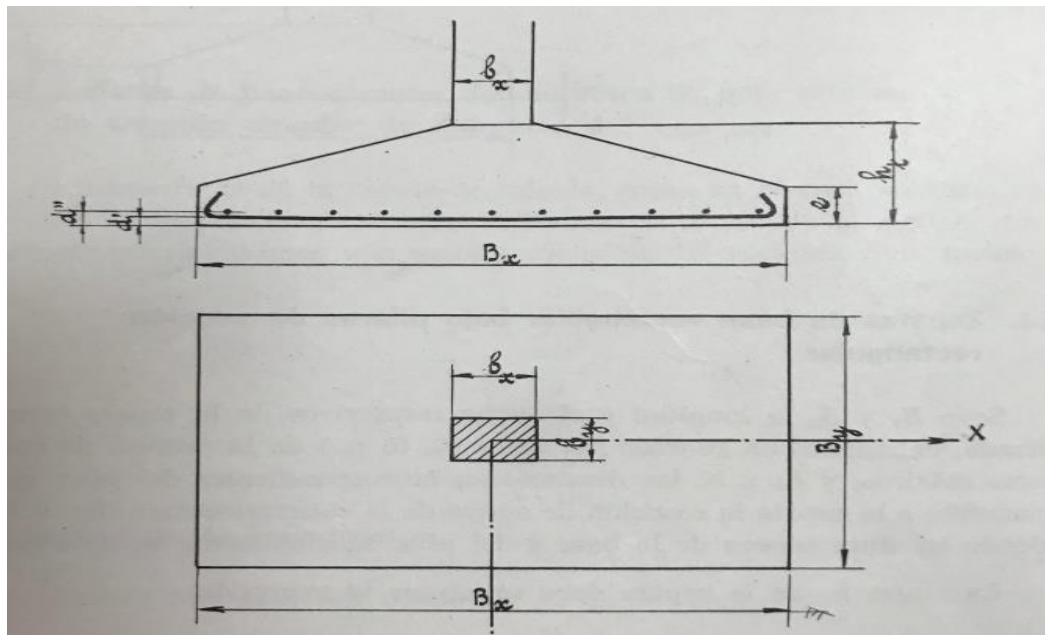
La losa de cimentación, a la que en ocasiones se le refiere como placa de cimentación, es una zapata combinada que puede cubrir toda el área debajo de una estructura que soporta varias columnas y muros. Las losas de cimentación se prefieren en ocasiones para suelos que tienen capacidades de soporte de cargas bajas, pero que tendrán que soportar cargas altas de las columnas o muros de igual manera para ayudar a reducir el asentamiento de una estructura construida la losa debe ser soportada por pilotes. (DAS, 2015)

- Zapatas

Se construye debajo de una columna independiente, pueden tener forma cuadrada, rectangular o circular y se aplican donde la capacidad de carga del suelo es moderada; las zapatas aisladas forman una losa gruesa que pueden ser plana, escalonada o inclinada. (Web, 2020)

En la “ilustración 2” se observa la vista en perfil y planta con la simbología utilizada para la elaboración de una zapata cuadrada.

Ilustración 2 Modelo zapata cuadrada



Fuente: (REIMBERT, 1978)

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

La ejecución de las zapatas de cimentación de una superestructura y la aplicación de las cargas de servicio que deben transmitir al suelo, producen una compresión del mismo y como consecuencia un hundimiento generalmente pequeño en el suelo, pero que no se debe despreciar en relación a su elasticidad. El asentamiento del suelo debido a esta compresión que provoca la expulsión del agua que generalmente contienen se le conoce como el proceso de consolidación, cuyas características se determinan por los ensayos de los laboratorios. (REIMBERT, 1978)

Si el terreno sobre el que debe edificarse una superestructura es estratificado, la determinación de las tensiones normales en el interior de este terreno, bajo el efecto de las cargas transmitidas por las zapatas de apoyo, se realiza según el mismo proceso de cálculo en condición de rigidez, teniendo en cuenta la forma de las zapatas: circular, cuadrada, rectangular o continua. (DAS, 2015)

5.1.5. método de Mohr-Coulomb

El criterio de falla de Mohr-Coulomb (1900), presentado en la “ecuación 2” propone una teoría para la ruptura en los materiales. Esta teoría sostiene que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante. Por lo tanto, la relación funcional entre el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante en un plano de falla se puede expresar en la forma:

Ecuación 1 Teoría general esfuerzo cortante

$$\tau_f = f(\sigma)$$

Donde,

τ_f = Esfuerzo cortante en el plano de falla

σ = Esfuerzo normal en el plano de falla

Ecuación 2 Criterio de falla de Mohr - Coulomb

$$\tau = \sigma \tan \phi + C$$

Donde,

τ = Esfuerzo cortante

σ = Tensión de normal

C = Cohesión

ϕ = Ángulo de fricción

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Cohesión

“La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas del suelo.

En suelos eminentemente granulares en los cuales no existen ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a cero “0” y a estos suelos se le denomina no cohesivo”. (Suarez Díaz, junio 1998)

Ángulo de fricción

“El ángulo de fricción se define como la presentación matemática del coeficiente de rozamiento. Este ángulo depende de varios factores entre los cuales se encuentra el tamaño de los granos, forma de los granos, distribución de los granos y su densidad” (Suarez Díaz, junio 1998)

“El ángulo de fricción puede ser determinado para suelos granulares o suelos cohesivos. Para los suelos granulares se realiza la prueba de corte directo, la cual produce un ángulo de fricción mayor comparado con el obtenido mediante la prueba triaxial” (DAS, 2015)

5.1.6. teorías convencionales

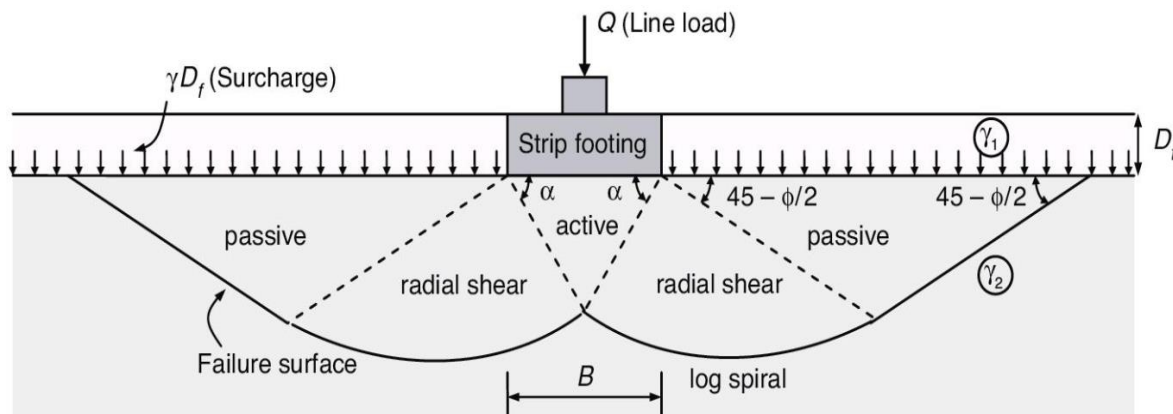
Teoría de Terzaghi

La teoría de Terzaghi (1943) presenta una teoría global para evaluar la capacidad última de carga de cimentaciones poco profundas. De acuerdo con esta teoría, una cimentación es poco profunda si la profundidad de la zapata con respecto a la superficie es menor o igual que el ancho de la cimentación.

Terzaghi sugirió que para una cimentación continua o de franja (es decir, la razón de ancho a largo de la cimentación tiende a cero “0”), las superficies de falla en el suelo a carga máxima pueden suponerse similar a la mostrada en la “Ilustración 3”. (DAS, 2015)

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Ilustración 3 Falla de la capacidad de carga en un suelo bajo una cimentación continua rígida en grava



Fuente: (DAS, 2015)

En la “ilustración 3” se observa el comportamiento típico de falla del suelo al ser sometido a una carga distribuida transmitida por la zapata.

Cuando se construye la cimentación, los cambios tienen lugar en el suelo bajo los cimientos; el esfuerzo neto del sistema suele aumentar. Este aumento neto del esfuerzo en el suelo depende de la carga por unidad de superficie a la que se somete la cimentación, la profundidad a la que se hace la estimación del esfuerzo y otros factores. (DAS, 2015)

Por otro lado, el comportamiento de una masa de suelo depende de la diferencia entre el esfuerzo total y la presión atmosférica que ejerce el agua en los vacíos de un suelo, a esta diferencia se le conoce como esfuerzo efectivo de los suelos.

Un suelo estratificado es aquel que se compone por varias capas una sobre otra de diferentes materiales encontrando, un suelo de baja resistencia sobre un suelo con mejores condiciones mecánicas e igualmente en su forma inversa.

Teoría de Meyerhof

“Meyerhof propuso una fórmula para calcular la carga última basada en los planteamientos de Terzaghi, las diferencias consisten en la introducción de nuevos coeficientes de forma de la fundación”.

“En la teoría de Terzaghi no se toma en cuenta los esfuerzos cortantes desarrolladas en el suelo arriba del nivel de desplante del cimiento. El suelo arriba del nivel de desplante se toma en cuenta únicamente como una sobrecarga perfectamente flexible; pero no como un medio a través del cual puedan propagarse superficies de deslizamiento o en el cual pueda desarrollarse resistencia al esfuerzo

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

cortante. Meyerhof trato de cubrir esta deficiencia con una teoría de capacidad de carga que ha alcanzado amplia difusión en épocas recientes” (Legorreta Cuevas, Lopez Rincon, & Rivera Constantino, 2018)

Ecuaciones de carga

Las ecuaciones de capacidad de carga evalúan suelos estratificados en los cuales un solo suelo soporta la base de la zapata y el otro soporta el suelo de diferentes características mecánicas, y los considera infinitos en su extensión, por lo cual, los hace viables para su análisis de carga.

Siendo así, se puede observar que la falla de carga máxima transmitida por la zapata puede extenderse a través de dos o más suelos en capas. La determinación de la capacidad de carga admisible máxima en suelos en capas, puede ser hecha en solo un número limitado de casos. Para el desarrollo de estos casos es utilizada la teoría de Meyerhof (1974) y Meyerhof and Hanna (1978).

Tabla 4 Parámetros físicos de suelos estratificados

Layer	Unit weight	Soil friction angle	Cohesion
Top	γ_1	ϕ_1	c_1
Bottom	γ_2	ϕ_2	c_2

Fuente: (Sitharam, 2013)

En la “tabla 4” se muestra la simbología utilizada en los suelos estratificados.

5.1.7. tipos de carga

Capacidad de carga última

La capacidad de carga última (q_u) es la carga por unidad de área que ocasiona falla por cortante en el suelo.

- Método carga última

La capacidad de carga última (q_u) se entiende como el esfuerzo que se aplica a un suelo, mediante una cimentación superficial para producir una falla en el subsuelo por resistencia al esfuerzo cortante. (Medina Mendoza, 2020)

La capacidad de carga (q_u) puede ser calculado de la siguiente manera:

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Ecuación 3 Carga ultima

$$q_u = q_b + \left(1 + \frac{B}{L}\right) \left(\frac{2C_a H}{B}\right) + \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{B}{L}\right) \left(1 + \frac{2D_f}{H}\right) \frac{K_s \tan \tan \phi_1}{B} - \gamma_1 H \leq q_t$$

$$q_u = q_b + \frac{2C_a H}{B} + \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D_f}{H}\right) \frac{K_s \tan \tan \phi_1}{B} - \gamma_1 H$$

Ecuación 4 Condición de carga ultima

$$q_u < q_t$$

Fuente: (Sitharam, 2013)

Donde

B = Ancho de la zapata

L = Longitud de cimentación

H = Profundidad de la zapata al suelo

γ_1 = Peso específico

C_a = Es la fuerza adhesiva

D_f = Profundidad desde la superficie hasta la zapata

K_s = Coeficiente punzonamiento

ϕ_1 = Ángulo de fricción

q_b = Capacidad de carga última en el lecho grueso del estrato del suelo inferior

q_t = Capacidad de carga última en el lecho grueso del estrato del suelo superior

q_u = Capacidad de carga última

Los factores q_b y q_t se determinan por medio de las siguientes ecuaciones:

Ecuación 5 Carga ultima del suelo inferior

$$q_b = C_2 N_{c(2)} F_{cs(2)} + \gamma_1 (D_f + H) N_{q(2)} F_{qs(2)} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma(2)} F_{\gamma s(2)}$$

Ecuación 6 Carga ultima del suelo superior

$$q_t = C_1 N_{c(1)} F_{cs(1)} + \gamma_1 D_f N_{q(1)} F_{qs(1)} + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_{\gamma(1)} F_{\gamma s(1)}$$

Fuente: (Sitharam, 2013)

Donde,

$F_{sc1}; F_{qs1}; F_{ys1}$ = Factores de forma con respecto a la capa superior.

$F_{sc2}; F_{qs2}; F_{ys2}$ = Factores de forma con respecto a la capa inferior.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

En la “tablas 5”, se muestran los cuadros resumen donde se encuentran los factores de forma, inclinación y profundidad correspondientes a la ecuación de carga última propuesto por Meyerhof.

Tabla 5 Factores de capacidad de carga de Meyerhof

ϕ'	N_c	N_q	N_γ	ϕ'	N_c	N_q	N_γ
0	5.14	1.00	0.00	26	22.25	11.85	12.54
1	5.38	1.09	0.07	27	23.94	13.20	14.47
2	5.63	1.20	0.15	28	25.80	14.72	16.72
3	5.90	1.31	0.24	29	27.86	16.44	19.34
4	6.19	1.43	0.34	30	30.14	18.40	22.40
5	6.49	1.57	0.45	31	32.67	20.63	25.99
6	6.81	1.72	0.57	32	35.49	23.18	30.22
7	7.16	1.88	0.71	33	38.64	26.09	35.19
8	7.53	2.06	0.86	34	42.16	29.44	41.06
9	7.92	2.25	1.03	35	46.12	33.30	48.03
10	8.35	2.47	1.22	36	50.59	37.75	56.31
11	8.80	2.71	1.44	37	55.63	42.92	66.19
12	9.28	2.97	1.69	38	61.35	48.93	78.03
13	9.81	3.26	1.97	39	67.87	55.96	92.25
14	10.37	3.59	2.29	40	75.31	64.20	109.41
15	10.98	3.94	2.65	41	83.86	73.90	130.22
16	11.63	4.34	3.06	42	93.71	85.38	155.55
17	12.34	4.77	3.53	43	105.11	99.02	186.54
18	13.10	5.26	4.07	44	118.37	115.31	224.64
19	13.93	5.80	4.68	45	133.88	134.88	271.76
20	14.83	6.40	5.39	46	152.10	158.51	330.35
21	15.82	7.07	6.20	47	173.64	187.21	403.67
22	16.88	7.82	7.13	48	199.26	222.31	496.01
23	18.05	8.66	8.20	49	229.93	265.51	613.16
24	19.32	9.60	9.44	50	266.89	319.07	762.89
25	20.72	10.66	10.88				

Fuente: (Sitharam, 2013)

Capacidad de carga admisible

La carga admisible en una cimentación es aquella que puede ser aplicada sin producir desperfectos en la estructura soportada, teniendo, además, un margen de seguridad dado por el llamado coeficiente de seguridad adoptado. La carga admisible no depende únicamente del terreno, sino también de la cimentación, característica de la estructura y del coeficiente de seguridad que se adopte en cada caso. (VILLALAZ, 2008).

La capacidad de carga, ocurre como producto de una rotura por corte del suelo de desplante de la cimentación. (VILLALAZ, 2008).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

La capacidad de carga admisible bruta se define como la capacidad de carga última sobre el factor de seguridad. (DAS, 2015).

Ecuación 7 Capacidad carga admisible

$$q_{adm} = \frac{q_u}{F_s}$$

Donde,

q_{adm} = Capacidad de carga admisible

q_u = Capacidad de carga última

F_s = Factor de seguridad

Factor de seguridad

“En ingeniería civil el factor de seguridad “Fs” se define como la relación entre las fuerzas resistentes y actuantes, este también se puede definir en términos de los esfuerzos actuantes y resistente.

La selección de los factores de seguridad debe justificarse plenamente teniendo en cuenta: la magnitud de la obra, las consecuencias de una posible falla en la edificación o sus cimentaciones y la calidad de la información disponible en materia de suelos”. (Ministerio de ambiente y vivienda y desarrollo territorial, 2014)

5.1.8. tipos de falla

En un terreno se pueden encontrar esencialmente dos tipos de falla: Punzonamiento o corte. Según las condiciones del suelo varios casos se pueden presentar:

Suelos homogéneos

Los suelos homogéneos presentan características mecánicas iguales en toda la extensión y se presentan los siguientes casos de falla:

- Falla por corte general. Se tiene en arenas densas y arcillas rígidas
- Falla por punzonamiento
- Falla por corte local. Se tiene en arenas medias y flojas y en arcillas suaves

Suelos estratificados

Los suelos heterogéneos presentan dos o más tipos de suelo con diferentes características mecánicas y presentan los siguientes casos de falla:

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

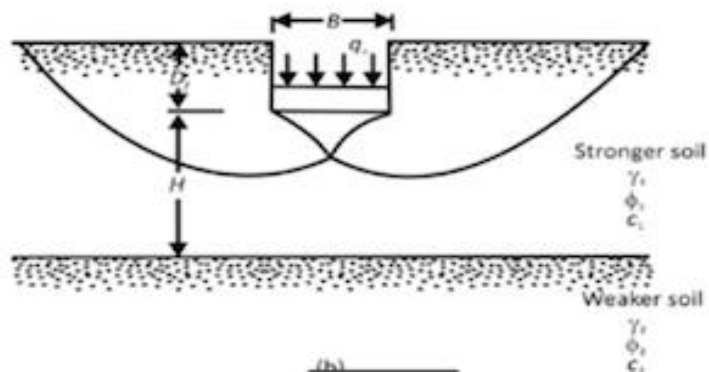
- Falla por corte general en el estrato superior
- Falla por punzonamiento

En esta investigación se trabaja con los comportamientos de falla de los suelos estratificados, en donde el suelo superior (relleno granular) presenta mayor rigidez que el suelo subyacente o suelo natural blando.

- Falla por corte general en el estrato superior

Si la profundidad (H) es significativamente mayor a la base de la fundación, entonces la superficie de falla será completamente localizada en el estrato superior del suelo, en este caso se entiende como un suelo homogéneo y se evalúa con la ecuación de Terzaghi.

Ilustración 4 Falla en el estrato superior



Fuente: (Sitharam, 2013)

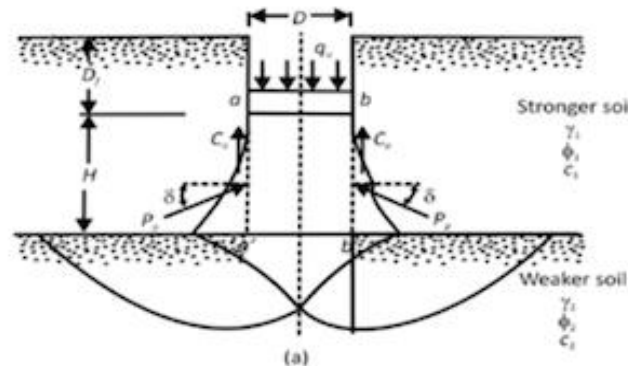
En la “ilustración 4” se observa cual es el comportamiento de falla del suelo estratificado (suelo rígido sobre un suelo blando) cuando es sometido a una carga transmitida por una zapata.

- Falla por punzonamiento

Esta falla se presenta cuando se tienen condiciones donde la profundidad H es relativamente pequeña comparado con el ancho de la base B . El suelo del estrato superior de mayor rigidez se desplazará uniformemente con la fundación, hincándose o punzando el suelo débil, hasta alcanzar un fallo por corte general en el suelo blando, como se puede observar en la “ilustración 5”.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Ilustración 5 Falla de punzonamiento



Fuente: (Sitharam, 2013)

La falla de punzonamiento cuenta con un coeficiente de punzonamiento “Ks”, este coeficiente varía en función de q_2/q_1 , donde q_2 hace referencia a la capacidad de carga del suelo natural y q_1 al suelo de mejoramiento, los cuales determinan la máxima carga de una base y ϕ_1 conocido como el ángulo de fricción del suelo superior el cual se muestra en la “ilustración 5”; este esfuerzo es producido por tracciones en una pieza, los esfuerzos tangenciales originados por una carga localizada en la superficie. (Sitharam, 2013).

Ecuación 8 Coeficiente de punzonamiento

$$K_s = f\left(\frac{q_2}{q_1}, \phi_1\right)$$

Fuente: (Sitharam, 2013)

Los coeficientes q_1 y q_2 se determinan en las siguientes ecuaciones y estos establecen la capacidad de máxima de carga de una base continua de ancho B bajo una carga vertical, en suelos estratificados donde q_1 pertenece al suelo superior y q_2 al suelo inferior.

Ecuación 9 Carga del suelo de mejoramiento

$$q_1 = C_1 N_{c(1)} + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_\gamma$$

Ecuación 10 Carga del suelo natural

$$q_2 = C_2 N_{c(2)} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_\gamma$$

Fuente: (Sitharam, 2013)

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Donde,

C_1 y C_2 , son las cohesiones respectivas de cada suelo

B , corresponde al ancho de la zapata

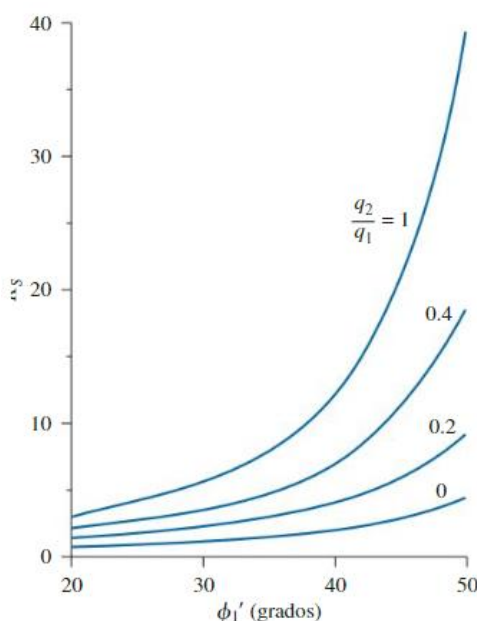
γ_1 y γ_2 , son los pesos específicos de cada suelo

N_{c1} , N_{y1} , son los factores de capacidad de carga por el ángulo de fricción y ϕ para el suelo superior.

N_{c2} , N_{y2} , son los factores de capacidad de carga por el ángulo de fricción y ϕ para el suelo inferior.

El coeficiente de punzonamiento se determina mediante la siguiente gráfica de la “ilustración 6”, en la cual según sea el ángulo de fricción del material utilizado y la división entre los factores q_1 y q_2 , se determinará el valor de “ K_s ”.

Ilustración 6 Relación coeficiente de punzonamiento y ángulo de fricción



Fuente: (DAS, 2015)

Nota: Es importante observar que en la “ilustración 6”, para el estrato superior de un suelo fuerte, la relación q_2/q_1 debería dar como resultado menor a uno.

5.1.9. optimum G2

Optum G2 es un programa de modelación geotécnico mediante la técnica de elementos finitos, el cual proporciona de manera fiable y eficiente la simulación de

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

cimentaciones, dando como resultado la carga ruptura que soporta un suelo y cómo será su comportamiento de falla. (OPTUM, 2019)

Su aplicación es versátil y sencilla, Optum G2 permite realizar diseños con diferentes tipos de suelo y definir sus características geotécnicas. Igualmente, el espesor y área de extensión de los estratos de suelo pueden ser variados y en diferentes configuraciones geométricas. Adicionalmente, las cargas aplicadas al suelo de fundación pueden ser definidas en múltiples configuraciones (ej. Puntuales, distribuidas) y en diferentes direcciones del plano cartesiano.

Funcionamiento

El programa Optum G2 tiene como finalidad mostrar el comportamiento de falla que producirá un suelo con ciertas características, el cual puede ser sometido a diferentes cargas transmitidas por las cimentaciones superficiales, determinando cual es la capacidad de carga admisible del suelo.

El análisis que proporciona el programa para determinar las capacidades del suelo es conveniente y eficiente, suministrando un medio de verificación numérica, la cual dispone de un análisis elastoplástico y de consolidación para determinar los asentamientos. Los análisis que genera el programa se realiza mediante la técnica de elementos finitos.

Las dimensiones de la cimentación superficial son constantes ya que se pueden facilitar directamente, mientras que las características del suelo se proporcionan dependiendo de qué tipo de material se esté empleando, sea una arcilla, arena, grava, entre otros. Los datos que se necesitan para dar brindar las propiedades del suelo son:

- ángulo de fricción.
- peso específico seco y saturado.
- cohesión.

El programa muestra una interfaz de inicio en la cual se pueden diseñar diferentes configuraciones del suelo según sean las necesidades del usuario, se definen los materiales a emplear con diferentes características mecánicas entre ellos. Finalmente muestra cómo será el comportamiento de falla de los diseños propuestos, mostrando los puntos donde se genera mayor deformación del suelo al ser sometido a cargas continuas.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Elementos finitos

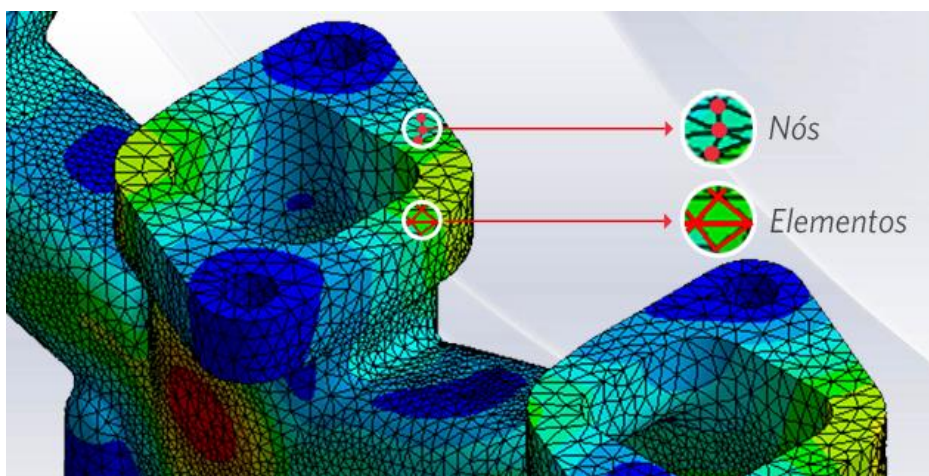
La técnica de elementos finitos es un método numérico de resolución de problemas de diversa índole, entre ellos la mecánica de suelos. Dada la versatilidad de elementos finitos, se ha convertido en una técnica de cálculo de gran importancia y aplicaciones prácticas (UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, 2019)

El método de elemento finitos es un método numérico muy potente, donde permite al ingeniero resolver infinidad de problemas. La idea básica del funcionamiento del método, es tener un sólido sometido a un sistema de cargas, el cual reacciona por unas ligaduras. El método de los elementos finitos consta de subdividir el sólido en pequeñas partes interconectadas entre sí, a través de unos nudos de los elementos, de manera que evalúa el campo de desplazamiento del nudo del elemento al ser sometido por una carga, este movimiento se conoce como el desplazamiento nodal.

Posteriormente se determina la matriz de rigidez de cada elemento, estas matrices se unen y permiten saber los desplazamientos en los nudos de los elementos, de esta forma se puede conocer de una manera aproximada las tensiones y deformaciones en el interior del elemento sometido a estudio. (Alarcón Álvarez & Fraile de Lerma, 2011)

La división del elemento a estudio se hace mediante pequeños triángulos, los cuales forman los nudos y elementos. Posteriormente se evalúan los posibles desplazamientos en función a la carga aplicada, esta división de los elementos se puede observar en la “ilustración 7”.

Ilustración 7 División de elementos



Fuente: (Mirlisenna, 2016)

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

En la “ilustración 7”, se observan cuáles son los nudos que se forman mediante la división del elemento y cuáles son los elemento en los que se subdivide el sólido.

El análisis de los elementos formado en la subdivisión del sólido, se puede realizar de 4 diferentes maneras:

- “Lower: este análisis de los elementos en la estructura, comprende un estudio de los elementos que se encuentran en la parte inferior del sólido, permite saber el campo de tensión que tienen estos elementos y brinda la deformación o la carga mínima que presentan los mismos.
- Upper: el análisis Upper, comprende a los elementos superiores de la subdivisión del sólido, y permite el cálculo de la deformación o la carga máxima que puede ser sometida en los elementos”. (Krabbenhoft, Lymain, & Krabbenhoft, 2016)
- 6 nodos de gauss: consiste en la subdivisión del sólido a estudio en elementos que se conformen por 6 nudos, en los cuales se miran los desplazamientos pertinentes de los nudos conformados.
- 15 nodos de gauss: consiste en la subdivisión del sólido a estudio en elementos que se conformen por 15 nudos en su estructura para la conformación del elemento, lo cual indica que se genera una subdivisión muchas más grande del sólido.

5.2. MARCO LEGAL

IDU 400-11, esta norma “especificación técnica de capas granulares de base y sub-base”, define los 3 tipos de materiales granulares para la subbase, mostrando cuál es su denominación y cuáles son los requisitos mínimos que deben tener estos agregados.

I.N.V. E – 320 – 13, “sub-base granular”, muestra de manera más específica las clases de subbase granular existente en función a la calidad de sus agregados, identificando cuales son los requisitos de calidad para los agregados en función de su dureza, durabilidad, limpieza y resistencia del material, de igual manera muestran cuales son las franjas granulométricas del material.

I.N.V. E – 610 – 13, “requisitos de suelos para rellenos de estructuras”, se observa cuáles son los materiales que se emplean en la construcción de rellenos para estructuras, mostrando los requisitos mínimos del suelo para rellenos entre los cuales proponen al recebo como material apto para ser utilizado como relleno, de igual manera define los requisitos que deben cumplir el material de recebo según sea su clasificación y sus franjas granulométricas.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

NC-MN-OC-07- 02, la norma de construcción de cimentación dada por EPM muestra que aspectos constructivos deben cumplir las cimentaciones superficiales, define de igual manera que es una zapata y cuál es su funcionamiento y como puede ser construida según el tipo de cemento que se utilice.

5.3. ESTADO DEL ARTE

En este informe investigativo se adquirió información bibliográfica por medio de ensayos, libros, artículos científicos entre otros, que brindaron algún tipo de aporte para el desarrollo de este informe.

El artículo “Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load” de los autores “G.G. Meyerhof y Abel Hanna” investiga la capacidad de soporte que pueden tener subsuelos conformados por capas, en la cual se encuentra una capa rígida recubierta por un depósito débil y una capa de suelo blanda recubierta por un suelo rígido, al ser sometido por una carga de zapata circular, analizando los diferentes modos de falla que presenta el suelo. (Meyerhof & Hanna, 1978),

La investigación “Modelación con diferencias finitas del comportamiento dinámico de suelos estratificados sometidos a cargas en superficies casa 2D”, hace énfasis en la interacción suelo-fundación en donde debe garantizar la estabilidad geotécnica y estructural de un proyecto. Aquí se analiza el comportamiento al ser sometido a vibraciones de un suelo de dos estratos y con un cimiento de longitud infinita. Para su análisis utilizaron el método de modelaciones finitas en el dominio del tiempo, este trabajo investigativo brinda un primer acercamiento al comportamiento de los suelos estratificados al ser sometidos a cargas axiales por medio de cimentaciones superficiales. (villadiego estrada, 2018).

El trabajo investigativo “Comportamiento de suelos expansivos en cimentaciones superficiales”, muestra el mecanismo de falla de los suelos expansivos al ser sometidos a una carga de una cimentación superficial, igual que los principales agentes estabilizadores, para los suelos de estas características. (merchan infante, 2009).

El artículo científico “Análisis numerik jarak interaksi antara dua buah pondasi dangkal menerus pada tanah lempung” o en español “Análisis numérico de la distancia de interacción entre dos cimientos superficiales continuos en arcilla”, muestra el impacto de dos cimientos superficiales continuos en suelos arcillosos, determinando la capacidad de carga máxima en el terreno. Esta capacidad carga máxima es determinada numéricamente con el programa Optum G2. (Saputra, 2018).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

El artículo “Ultimate bearing capacity of rock masses under square and rectangular footings”, investiga la capacidad de carga final de masas rocosas por el método Hoek-Brown, sometidas bajo bases cuadradas y rectangulares, utilizando un análisis de elementos finitos tridimensionales. Estos análisis se realizaron con diferentes dimensiones de zapatas y diferentes propiedades de masas rocosas. Los resultados obtenidos fueron el mejoramiento de las propiedades del material por medio de mayores dimensiones de zapata, se pueden obtener mayores capacidades de carga. (mehdi mansouria, 2019).

El trabajo “Parámetros de resistencia al corte en la interfaz suelo concreto”, muestra los parámetros de resistencia al corte en la interfaz suelo-concreto. Se realizaron los ensayos de laboratorio de caracterización (gradación y límites de Atterberg) en el material de recebo, como también las pruebas de corte directo en condiciones de consolidadas. (Montoya Suarez, 2013).

El informe de la alcaldía distrital de Bogotá, “Estudio de suelos y análisis de cimentaciones puentes vehiculares (pontones) sobre el canal Salitre y el rio Juan Amarillo a acceso al barrio Lisboa localidad de Suba-Bogotá D.C”, contiene los resultados correspondientes al estudio geotécnico de la zona para analizar, las características de la cimentación de los puentes y en general presentar todos los parámetros requeridos para el diseño estructural. (ALFONSO URIBE S. Y CIA Y LTDA, 2006). Se encontraron los parámetros requeridos por el programa para dar inicio a los diseños.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

6. METODOLOGÍA

La metodología que se aplicó en el presente trabajo investigativo, es en primer lugar, una revisión bibliográfica donde se indagaron los diferentes antecedentes de las técnicas de mejoramiento de suelo blando y el comportamiento de un suelo estratificado, “un suelo fuerte sobre un suelo débil”. En la revisión bibliográfica se tuvo en cuenta (ensayos, libros, tesis, artículos de investigación, etc).

Adicionalmente se realizó una profundización bibliográfica para la adquisición de las características mecánicas de los materiales empleados en esta investigación, rellenos granulares (subbase tipo c y recebo) y suelo natural.

Los datos encontrados de los materiales mencionados fueron cohesión, ángulos de fricción, peso específico saturado y seco. Estos datos son esenciales ya que son los parámetros de entrada para el análisis de la capacidad portante en métodos analíticos al igual que definen los materiales ingresados en el programa de elementos finitos Optum G2.

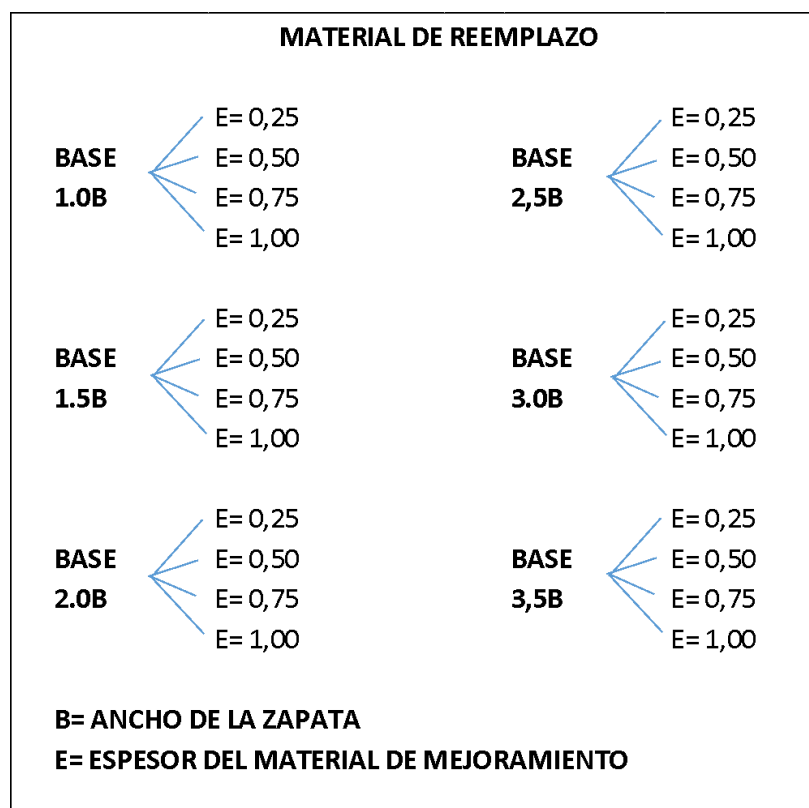
Al finalizar la revisión bibliográfica de los suelos, se procede con el cálculo de capacidad portante del suelo natural y de los tipos de relleno granular mediante la teoría analítica de Meyerhof & Hanna. Simultáneamente, se da inicio a la modelación numérica con el programa Optum G2 en el cual se diseñan diferentes configuraciones de área y espesor de material de reemplazo según lo mostrado en la “ilustración 8”.

Una vez realizada las modelaciones y calculo analíticos se procede con un comparativo de las técnicas de cálculo de la capacidad portante. Una vez validados los resultados, es viable definir si es eficiente o no el reemplazo de un material.

6.1. MATRIZ DEL MATERIAL DE REEMPLAZO

Las configuraciones propuestas para el estudio comparativo y de optimización de rellenos granulares a modelar en el programa Optum G2 varía en función del ancho de la zapata (B) y los espesores de relleno granular subyacente a la fundación. E ancho de relleno será equivalente a 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 y 3.5 veces el ancho de la fundación. Los espesores serán 0.25, 0.50, 0.75 y 1.0 metros, generando así 24 configuraciones diferentes por cada tipo de relleno granular según lo mostrado en la “ilustración 8”.

Ilustración 8 Matriz zapata VS espesor de material de mejoramiento



Fuente: Elaboración propia

Nota: En la “ilustración 8”, los valores correspondientes al ancho y al espesor del material de reemplazo están establecidos en unidades de metro (m).

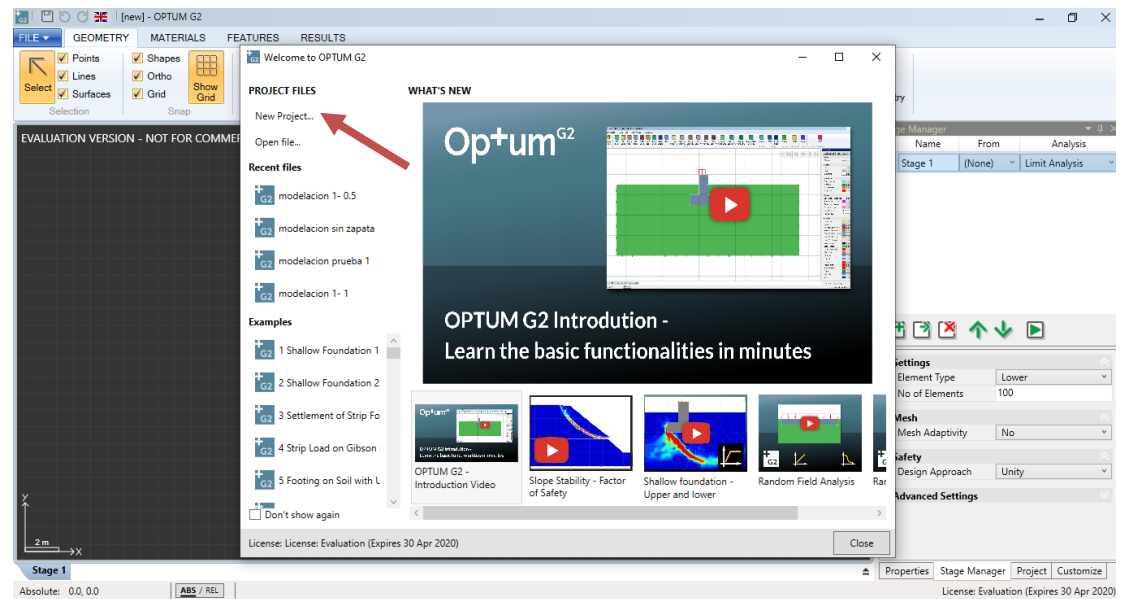
6.2. PASO A PASO PARA LA CREACIÓN DE MODELACIONES POR EL PROGRAMA OPTUM G2

El paso a paso para la creación de las modelaciones en el programa Optum G2 son las siguientes:

1. Se inicia el programa y se muestra las herramientas de archivo del programa, se selecciona nuevo proyecto. “Ilustración 9”.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO</p>	<p>FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0</p>
--	---	---

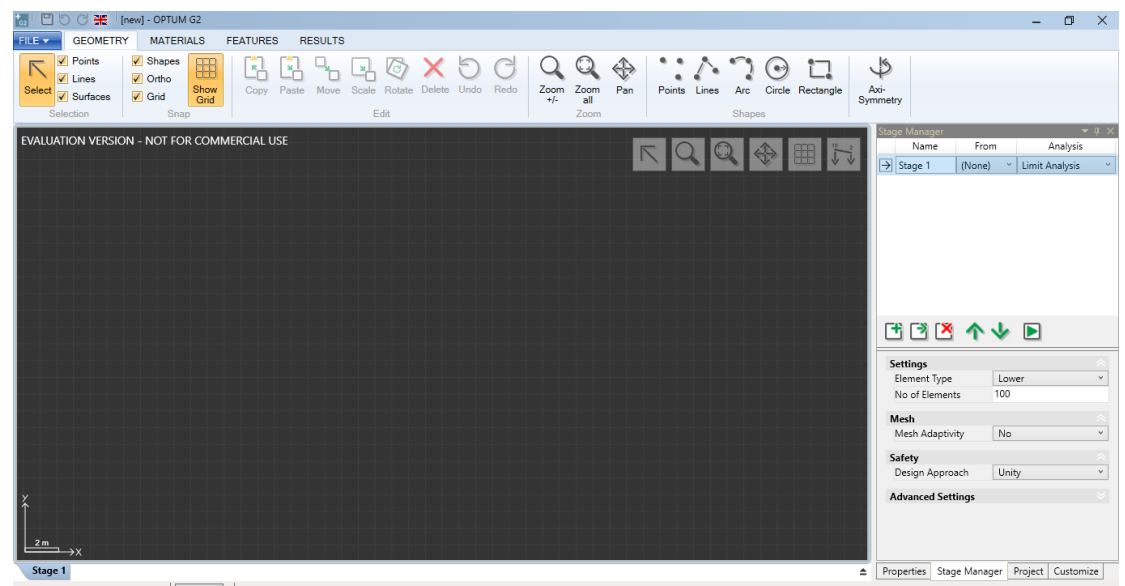
Ilustración 9 Programa Optum G2



Fuente: Optum G2

2. En la pantalla inicial del programa se puede empezar a dibujar las configuraciones que se desee realizar, como se observa en la “ilustración 10”

Ilustración 10 Plantilla inicial del programa



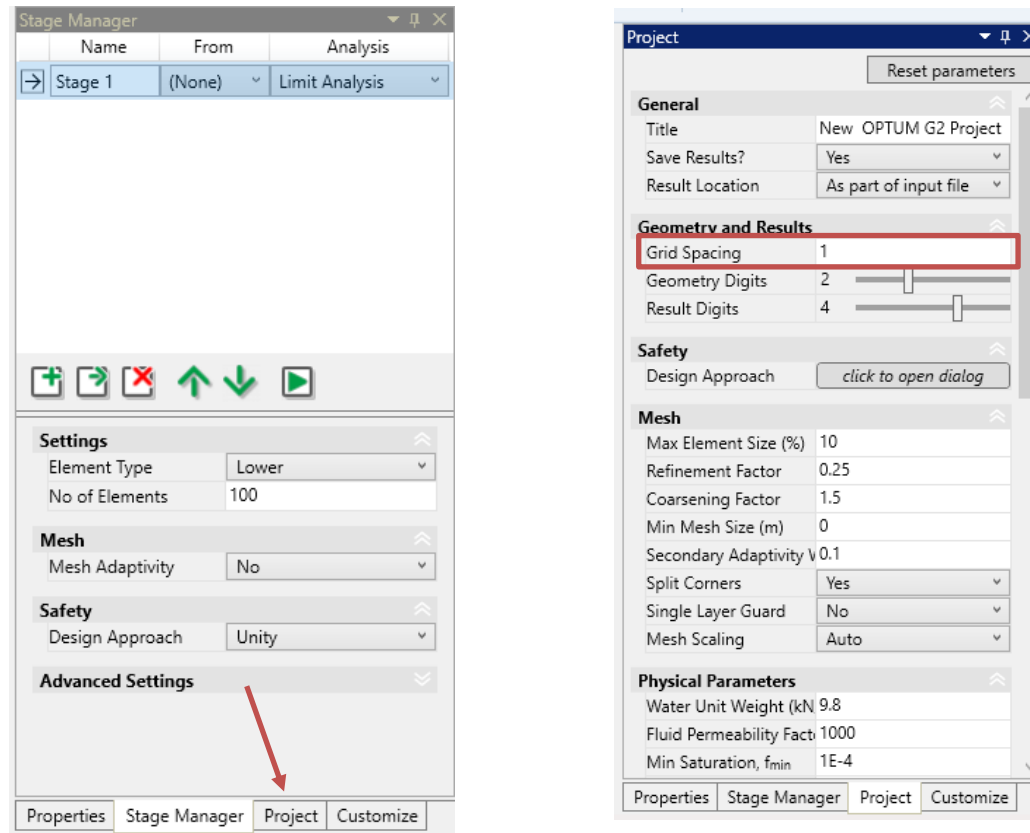
Fuente: Optum G2

3. En la parte derecha de la pantalla se encuentra la barra de configuraciones “ilustración 11”, donde se pueden manejar los aspectos del programa y de

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

los materiales. Al seleccionar la pestaña Project se configura la grilla a 1m, con el propósito de que cada espacio de la grilla corresponda a una distancia equivalente a un metro.

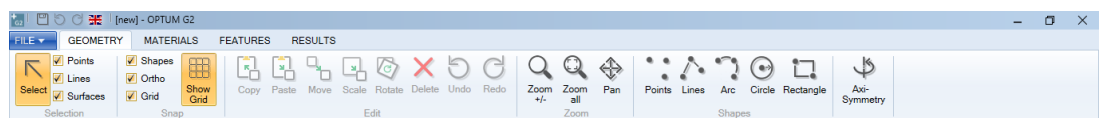
Ilustración 11 Barra de configuraciones



Fuente: Optum G2

- En la parte superior de la interfaz del programa, como se puede ver en la “ilustración 12” se encuentran las opciones de geometría o dibujo, materiales, aplicación de cargas y resultados.

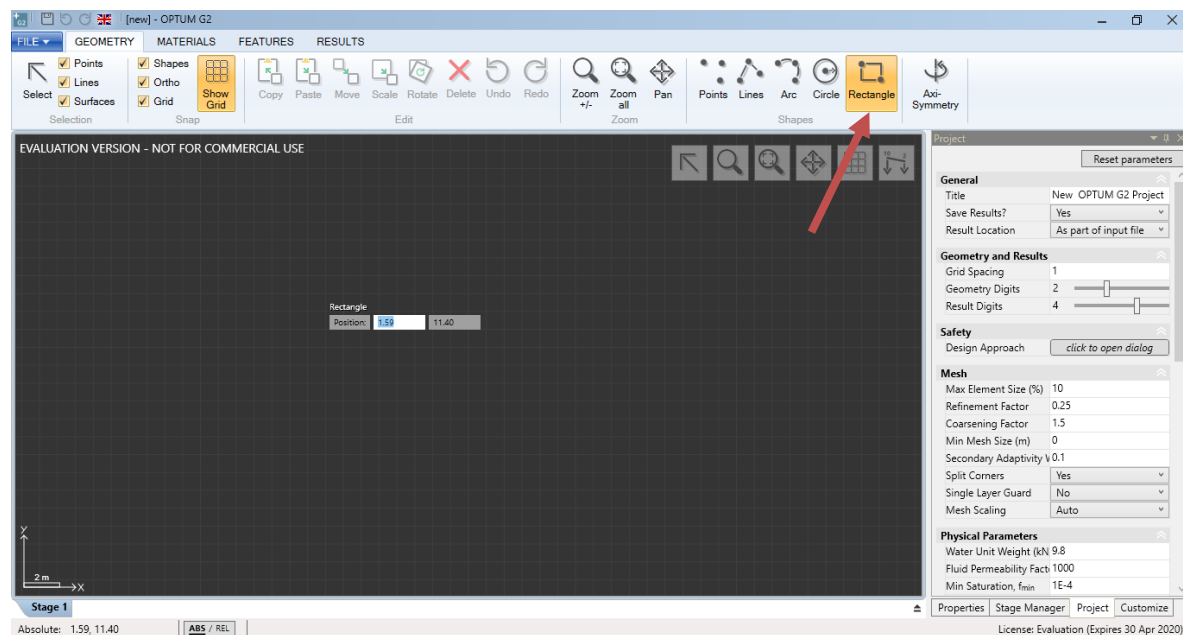
Ilustración 12 Barra de aplicaciones del programa



Fuente: Optum G2

- En la pestaña de geometría “ilustración 13”, se da inicio al dibujo. Según la necesidad, se busca la forma geométrica idónea para el dibujo. En este caso, para aspectos prácticos se usa el rectángulo y se inicia el diseño.

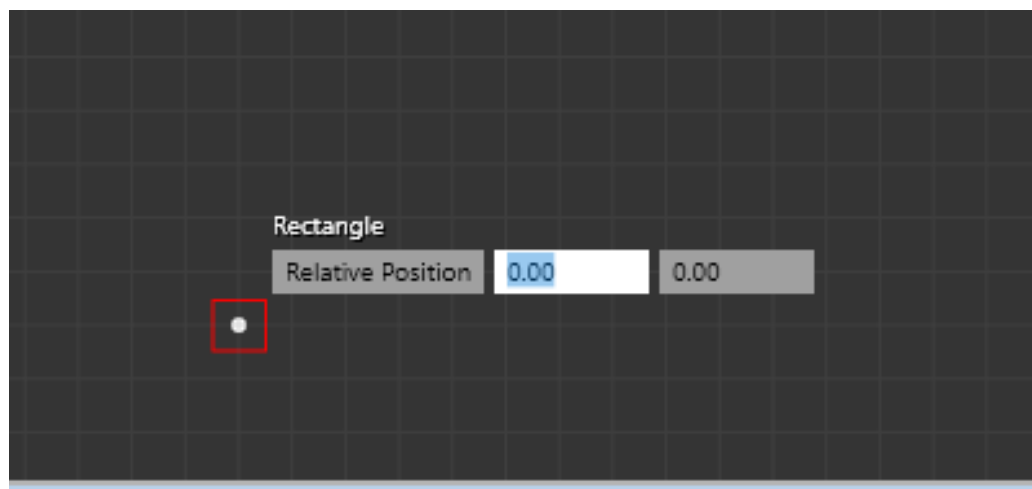
Ilustración 13 Selección de geometría del terreno



Fuente: Optum G2

- Adicionalmente, se puede observar que el cursor cambia inmediatamente cuando se realiza el paso anterior. Como se puede ver en la “ilustración 14”, el programa funciona por medio de coordenadas en la grilla, de esta forma se le indica al cursor que se localice en la posición (0,0), para iniciar con el diseño.

Ilustración 14 Medidas por coordenadas

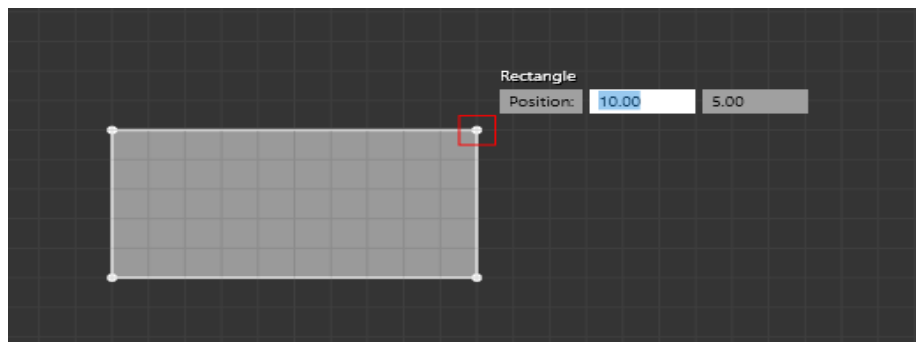


Fuente: Optum G2

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

- Una vez localizado el inicio “punto (0,0)”, se dibuja la figura geométrica. El programa al trabajar por orientación del eje cartesiano se le da la distancia que se desea iniciando con eje “x” y luego con el eje “y”. Esta distancia, se representa en metros dentro de la grilla y el programa crea automáticamente la figura, como en la “ilustración 15”.

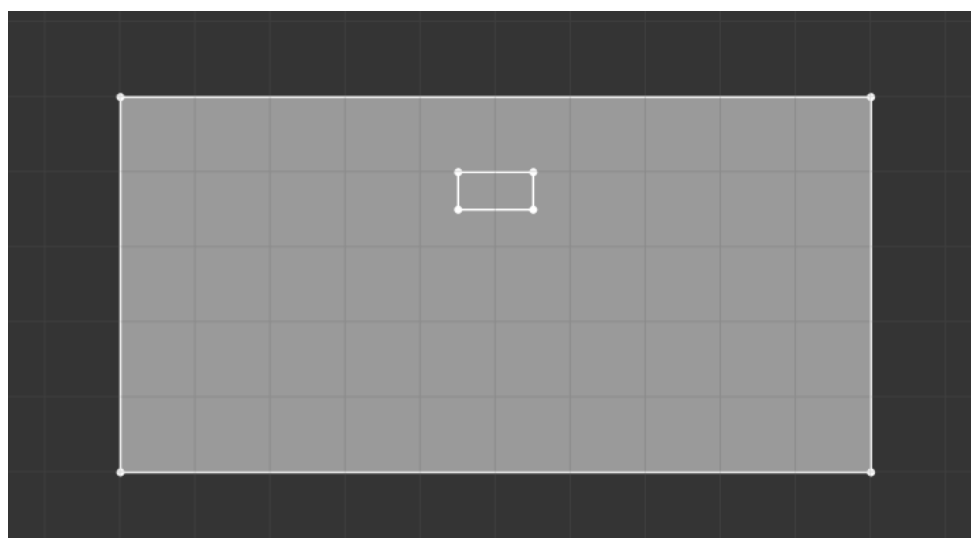
Ilustración 15 Valores del terreno por coordenadas



Fuente: Optum G2

- Para el desarrollo de este trabajo se manejan suelos estratificados. Por lo tanto, se realiza una dimensión establecida en la matriz de diseño mencionada anteriormente, se establece una profundidad de desplante de 1 metro con respecto a la superficie y se dan las dimensiones del material de reemplazo.

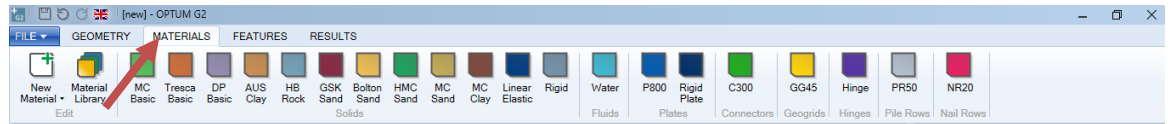
Ilustración 16 Dimensionamiento del suelo natural y de reemplazo



Fuente: Optum G2

9. Una vez se tiene el dibujo se configuran los materiales a emplear. Se selecciona en la ventana de materiales “ilustración 17”, donde se encuentra una gran variedad de materiales disponibles precargados.

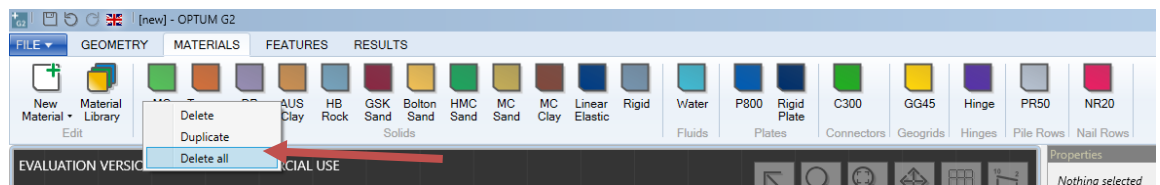
Ilustración 17 Clasificación del terreno a emplear



Fuente: Optum G2

10. Para efectos prácticos, se eliminan los materiales precargados, este procedimiento se realiza dando clic derecho en cualquier zona donde se muestran los materiales eliminándolos, como se muestra en la “ilustración 18”. Finalmente se empieza a configurar los materiales propuestos para el desarrollo de esta investigación.

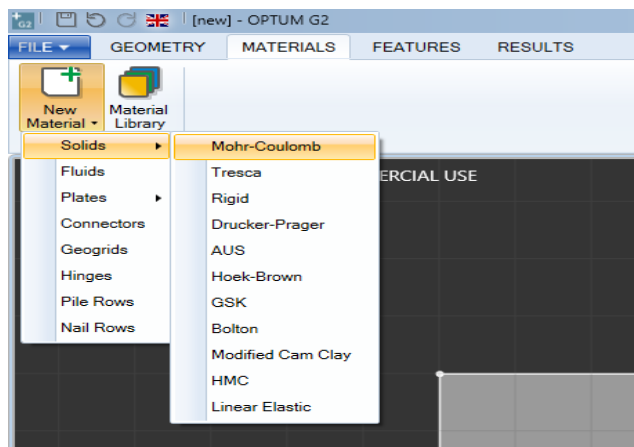
Ilustración 18 Eliminación de materiales precargados



Fuente: Optum G2

11. Para configurar un nuevo material se selecciona la pestaña de nuevo material y se elige un material sólido bajo la teoría de Mohr-Coulomb, como se puede ver en la “ilustración 19”.

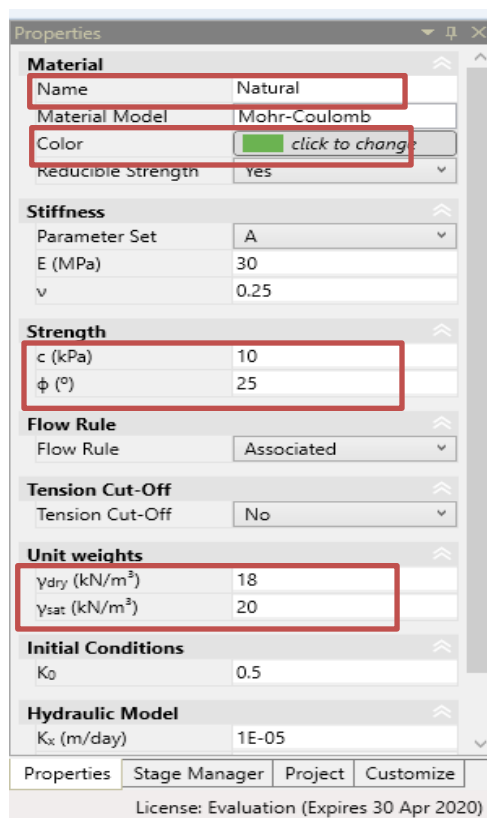
Ilustración 19 Selección tipo de materiales



Fuente: Optum G2

12. En la “ilustración 20”, se evidencia la barra de herramientas de las propiedades que se desean configurar con respecto al material que se desea trabajar. Se configura el nombre, el color, la cohesión, ángulo de fricción y los pesos unitarios secos y saturados.

Ilustración 20 Barra de herramientas para la clasificación del material

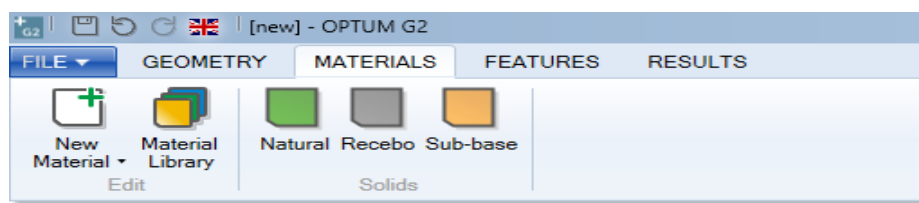


Fuente: Optum G2

Nota: Los pasos 11 y 12 se repiten dependiendo de la cantidad de materiales que se necesiten para desarrollar las modelaciones.

13. Una vez se configuren los materiales a usar, estos irán apareciendo en la pestaña superior para su posterior uso como en la “ilustración 21”.

Ilustración 21 Listado de materiales

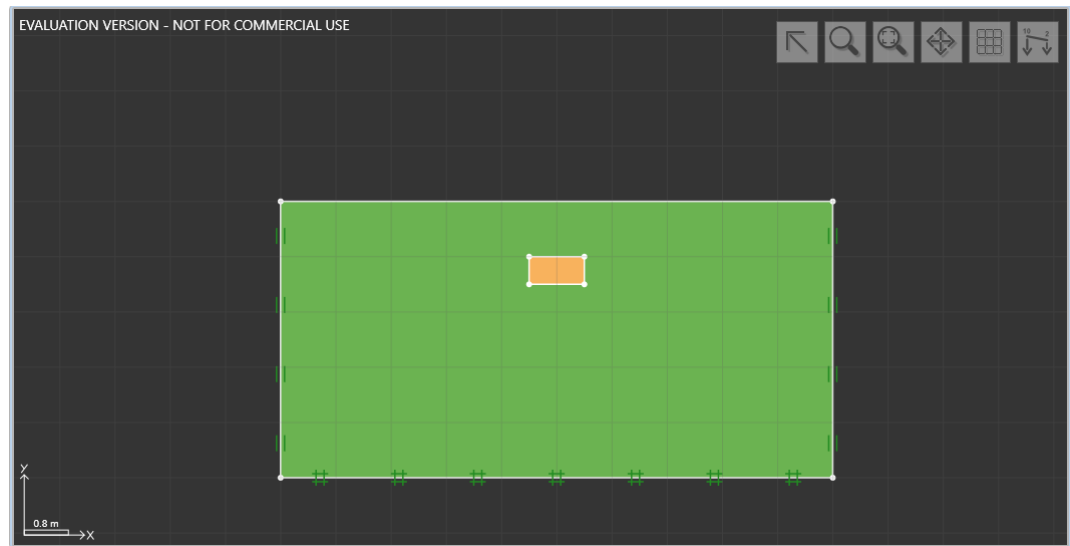


Fuente: Optum G2

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>	<p>ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO</p>	<p>FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0</p>
--	---	---

14. Se implementan los materiales configurados en el dibujo arrastrándolo el material al plano y posicionándolo en la ubicación deseada.

Ilustración 22 Aplicación de material a las dimensiones del terreno



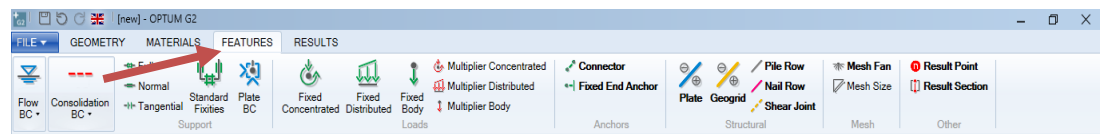
Fuente: Optum G2

Nota: este procedimiento se realiza dependiendo la cantidad de materiales que se tengan en el dibujo.

El programa es capaz de soportar más de dos materiales, para acceder al uso de más materiales se debe comprar la licencia completa, la cual tiene un costo muy elevado, por este motivo no se hace el dibujo correspondiente de la zapata.

15. Se ingresa la carga que soporta el suelo, esta carga puede ser configurada como una carga puntual o una carga distribuida, para esto se selecciona la opción de cargar como se puede observar en la “ilustración 23”

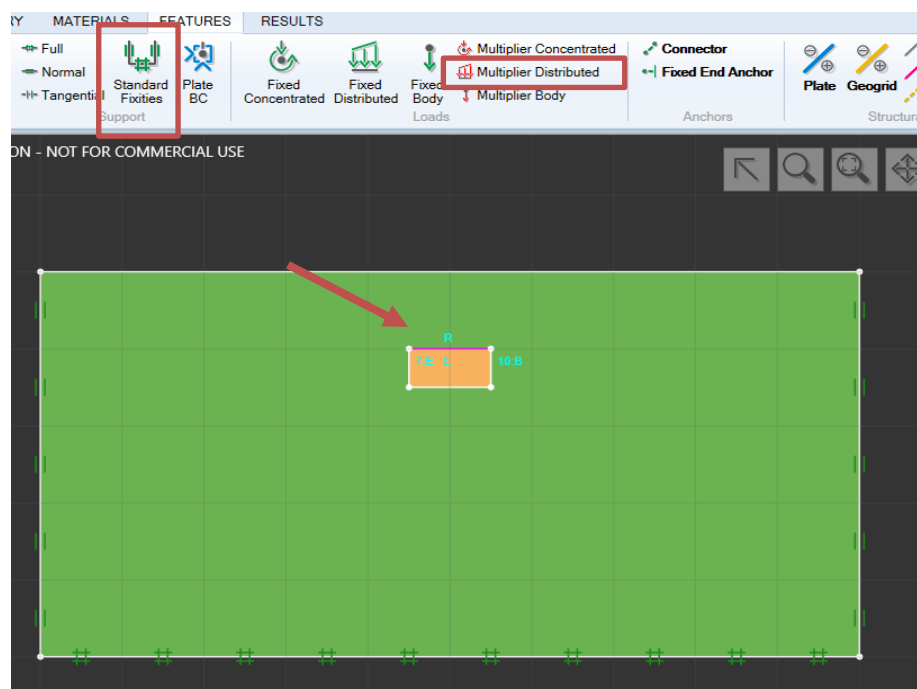
Ilustración 23 Métodos de carga



Fuente: Optum G2

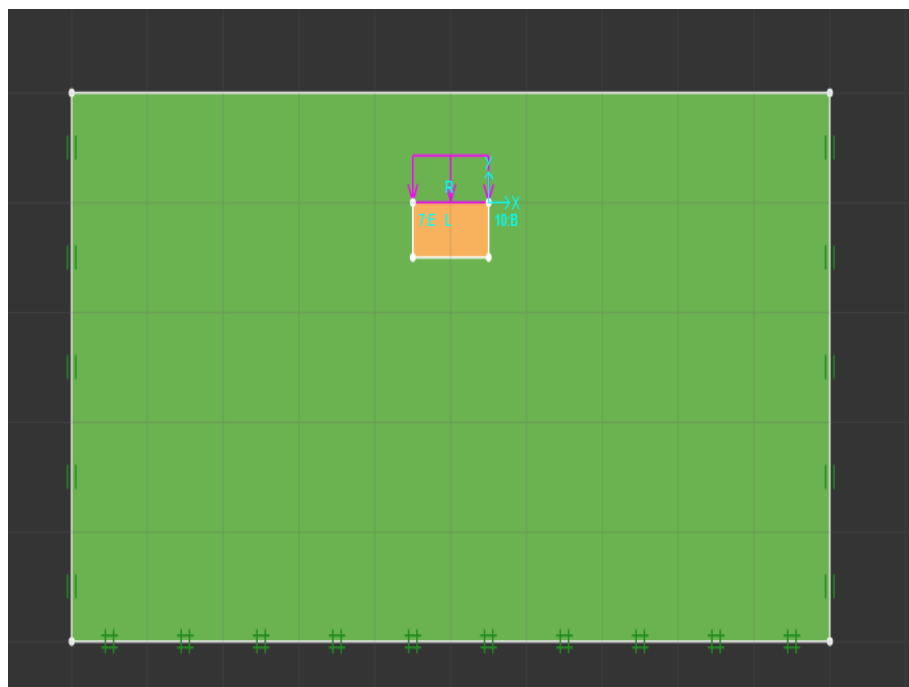
16. Damos clic en la pestaña de “standad fixieties”, se selecciona el elemento al que se va aplicar la carga, se escoge la opción “Multiplier distributed” y la carga se aplica automáticamente “ilustración 24 y 25”

Ilustración 24 Aplicación de carga distribuida



Fuente: Optum G2

Ilustración 25 Carga distribuida en el terreno de reemplazo

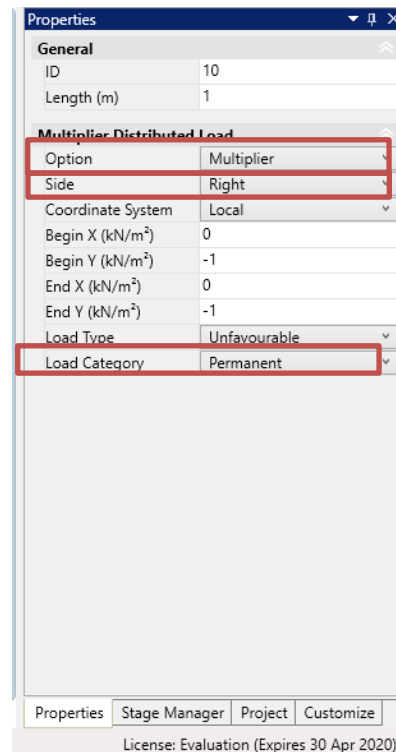


Fuente: Optum G2

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

17. Se realiza la configuración de la carga como múltiple y permanente “ilustración 26”.

Ilustración 26 Configuración de la carga

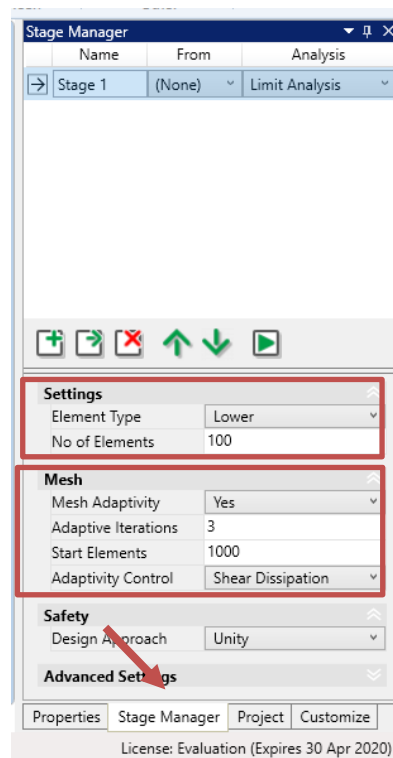


Fuente: Optum G2

Nota: es muy probable que la carga salga de manera invertida, esto se debe a la configuración del plano cartesiano, por lo cual en la configuración se debe tener en cuenta la opción de “slide”, la cual se debe encontrar a la derecha, así la carga se aplica de la manera correcta.

18. En la opción “stage manager” se configura la cantidad de elementos que se desean tener en el diseño, se debe activar la pestaña de “mesh” dejando los valores predeterminados que brinda el programa.

Ilustración 27 Configuración de elementos

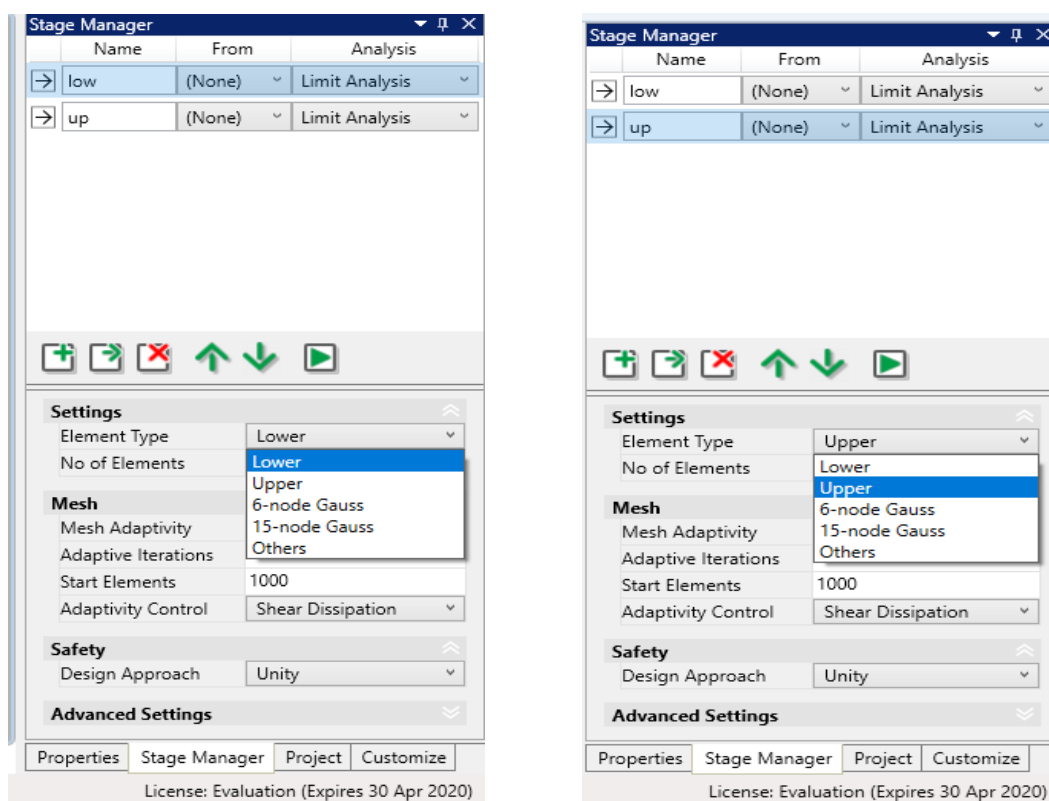


Fuente: Optum G2

Nota: la cantidad de elementos hace referencia a la cantidad de partículas en el diseño, esta cantidad puede ser mayor dependiendo al hardware que se disponga, entre más potencia, mayor capacidad de procesar elementos.

19. Después de esto, se deben duplicar los análisis, esto con el fin de obtener los resultados “Upper” y “Lower”, donde “Lower es el principio del límite inferior el cual permite un límite inferior en el colapso exacto construyendo un campo de tensión que satisfaga las restricciones” y “Upper es el límite superior al multiplicador de colapso exacto donde postula un campo de velocidad compatible que satisfaga la regla de flujo” (Krabbenhof, Lymain, & Krabbenhof, 2016), como se muestra en la “ilustración 28”.

Ilustración 28 Análisis inferior y superior de las capas

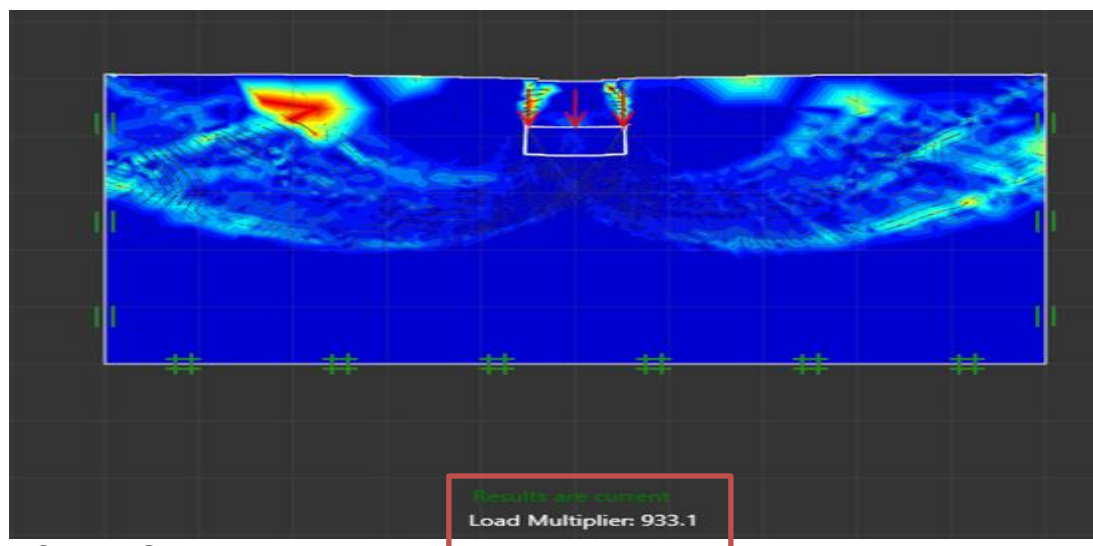


Fuente: Optum G2

20. Finalmente se corre el diseño, el programa solo correrá una de las capas establecidas en el paso 19. Este mostrará cómo será el comportamiento de falla del suelo con respecto a la carga aplicada, y dirá cuál es la carga máxima de resistencia en kPa, como se puede ver en la “ilustración 29”.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Ilustración 29 Resultado final de falla



Fuente: Optum G2

Nota: se debe correr el programa para las dos capas creadas y el promedio de los resultados es el valor de carga que resiste la configuración del suelo.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

7. PARÁMETROS UTILIZADOS

7.1. SUELO NATURAL

Los parámetros utilizados para el cálculo de la capacidad portante del suelo natural mediante el método analítico y las modelaciones con los elementos finitos fueron tomados del trabajo investigativo del instituto de desarrollo urbano (IDU), “Estudio de suelos y análisis de cimentaciones puentes vehiculares (pontones) sobre el canal salitre y el rio Juan Amarillo al acceso al barrio Lisboa localidad de Suba – Bogotá D.C.”. En este estudio se evidencian los valores de densidad del terreno a diferentes profundidades y en condiciones in-situ. Los valores encontrados se evidencian en la “tabla 6”.

Tabla 6 Humedad del terreno natural

Profundidad (m)	γ saturado (g/cm ³)	γ seco (g/cm ³)
1-2	-	-
2-3	-	-
3-4	-	-
4-5	1,870	1,390
5-6	-	-
6-7	-	-
7-8	1,690	1,090
8-9	1,690	1,090
9-10	-	-
10-11	-	-
11-12	-	-
Promedio	1,750	1,190

Fuente: Elaboración propia

Los valores de cohesión y ángulo de fricción se tomaron de los ensayos de compresión incofinada como se muestra en la “tabla 7”.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Tabla 7 Cohesión y ángulo de fricción del terreno natural

Profundidad (m)	Cohesión (Kg/cm ²)	Angulo de fricción
4 – 4.7	0.77	0
7.9 – 8.6	0.33	0
16.5 – 17.2	0.25	0
Promedio	0.45	0

Fuente: Elaboración propia

Para evitar el uso de datos extremos se decidió tomar el valor de cohesión y peso específico del suelo como el promedio de los datos disponibles. Estos valores serán empleados para determinar la capacidad portante del suelo natural.

7.2. MATERIAL RECEBO

Este material es propuesto como suelo de mejoramiento para las cimentaciones. En el estudio “Parámetros de resistencia al corte en la interfaz suelo concreto” (Montoya Suarez, 2013), se realizó la caracterización de varias muestras de recebo tipo INVIAS, obteniendo los parámetros físicos de ángulo de fricción y peso específico seco y saturado. Estos datos se evidencian en la “tabla 8”.

Tabla 8 Parámetros de recebo

Muestra	θ (Ángulo de fricción)	γ saturado (g/cm ³)	γ seco (g/cm ³)
1	29,601°	1,990	2,118
2	30,439°	2,132	2,310
3	34,896°	2,020	2,213
4	32,782°	-	-
Promedio	31,930°	2,047	2,214

Fuente: Elaboración propia

El ángulo de fricción del recebo y los pesos específicos empleados en el cálculo de capacidad portante de una fundación soportada en este tipo de relleno granular fueron tomados como el promedio de los datos disponibles, a fin de evitar la selección de valores extremos.

Adicionalmente, con la granulometría mostrada en las “tablas 9 y 10” se determinó el valor de la cohesión del recebo empleando el programa GEO5 – BENTLEY.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Tabla 9 Granulometría del recebo fracción gruesa

TAMIZ		PESO RETENIDO	RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	PASA
(mm)	(pulg)	(g)	(%)	(%)	(%)
76.1	3	0	0.00	0.00	100.00
64.0	2 ½	0	0.00	0.00	100.00
50.8	2	0	0.00	0.00	100.00
38.1	1 ½	100.9	1.85	1.85	98.15
25.4	1	510.3	9.37	11.22	88.78
19.0	¾	805.6	14.79	26.02	73.98
12.7	½	972.2	17.85	43.87	56.13
9.5	¾	559.8	10.28	54.15	45.85
4.8	No. 4	1212.0	22.26	76.41	23.59
2.0	No. 10	842.8	15.48	91.89	8.11
Fondo		441.9	8.11	100.00	0.00

Fuente: (MONTROY SUÁREZ, 2013)

Tabla 10 Granulometría del recebo fracción fina

TAMIZ		PESO RETENIDO	RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	PASA
(mm)	(pulg)	(g)	(%)	(%)	(%)
2.0	No. 10	0.7	1.03	1.03	98.97
0.425	No. 40	36.2	53.08	54.11	45.89
0.150	No. 100	14.8	21.70	75.81	24.19
0.075	No. 200	12.5	18.33	94.13	5.87
Fondo		4.0	5.87	100.00	0.00

Fuente: (MONTROY SUÁREZ, 2013)

7.3. MATERIAL SUB BASE

Con el apoyo de laboratorios externos fue posible adquirir informes de ensayos en el cual se detallan los resultados del ensayo de corte directo y pesos específicos de la sub-base tipo C, los cuales son mostrados en la “tabla 11”.

Tabla 11 Parámetros de sub-base tipo C

θ (Ángulo de fricción)	Cohesión (Kg/cm ²)	γ saturado (g/cm ³)	γ seco (g/cm ³)
35,61	0,06	1,5	1,6

Fuente: Elaboración propia

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

8.1. CAPACIDAD DE CARGA ULTIMA DEL SUELO SEGÚN LA TEORIA DE MEYERHOF

El cálculo de la capacidad portante mediante la teoría de Meyerhof y Meyerhof & Hanna, establece una desigualdad en la cual la carga última del suelo estratificado q_u (suelo rígido sobre suelo blando) debe ser menor que la capacidad portante del suelo rígido, considerado como único estrato q_t . Dicha condición se expresa en la “ecuación 4 condición de carga ultima”. $q_t > q_u$

Los resultados de carga ultima para el suelo natural al igual que el recebo y la subbase se presentan en la “tabla 12”. Se considera en estos resultados que los suelos son medios continuos homogéneos. La memoria de cálculo de estos valores se verificar en el anexo 1.

Tabla 12 Resultados de carga ultima

Tipo de suelo	Carga ultima q_t (kPa)
Suelo natural (Arcilla Blanda)	377.44
Recebo	775.17
Sub-base	873.10

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente se realiza el cálculo de la capacidad del suelo una vez se han realizado los remplazos del suelo natural con los rellenos granulares en diferentes espesores. La “tabla 13” presenta los reemplazos con recebo y la “tabla 14” los reemplazos con subbase

Es importante resaltar la teoría de Meyerhof considera un medio infinito, por tanto, el ancho del relleno no puede ser variado y solo se considera la base del cimiento “B”. En este escenario, solo se puede hacer una comparación con los valores correspondientes a la configuración de $1.00B$, variando los espesores de mejoramiento desde 0.25m hasta 1.0m.

8.1.1. Capacidad portante del suelo estratificado con el uso de diferentes tipos de relleno granular

Se comprobó que la relación $q_t > q_u$, se cumple para todos los espesores propuestos para esta investigación, lo cual responde de acuerdo con la teoría desarrollada por Meyerhof. Los valores de carga ultima para un estrato de recebo o sub-base (suelo rígido) sobre el suelo natural blando (arcilla blanda) son menores

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

comparados con la capacidad de un suelo homogéneo de recebo o sub-base, lo cual era esperado.

Tabla 13 Comprobación condición material recebo

COMPROBACIÓN Y VARIACIÓN $q_t > q_u$					
Material granular	q_t (kPa)	Base mejoramiento (m)	Espesor mejoramiento (m)	q_u (kPa)	Variación (%)
Recebo	775,15	1,00B	0,25	396,78	48,81%
			0,50	426,20	45,02%
			0,75	460,69	40,57%
			1,00	500,26	35,46%

Fuente: Elaboración propia

La capacidad de carga del suelo estratificado con recebo de 1 metro de espesor sobre arcilla blanda es 35.46%, más baja que un suelo conformado únicamente con recebo. Para reemplazos de recebo de solo 0.25 metros sobre el suelo natural, la capacidad de carga es 48.81% menor que el recebo homogéneo, estos resultados son mostrados en la “tabla 13.”

Tabla 14 Comprobación condición material sub-base

COMPROBACIÓN Y VARIACIÓN $q_t > q_u$					
Material granular	q_t (kPa)	Base mejoramiento (m)	Espesor mejoramiento (m)	q_u (kPa)	Variación (%)
Sub-base tipo C	873,1	1,00B	0,25	400,30	54,15%
			0,50	433,77	50,32%
			0,75	472,86	45,84%
			1,00	517,57	40,72%

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de pérdida de la capacidad de carga del material recebo al ser combinado con el suelo natural se encuentra en la “tabla 14”, donde se evidencia la variación a razón de 41.16% promedio.

8.1.2. Incremento de la capacidad portante del suelo natural debido a los rellenos granulares.

Como era esperado, el uso de rellenos granulares (ej. Recebo o subbase) incrementan la capacidad de carga del suelo natural. Al aumentar del espesor de

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

reemplazo subyacente a la fundación, incrementa proporcionalmente la capacidad de carga, según se muestra en las “tablas 15 y 16”

Tabla 15 Incremento de la capacidad de carga en el material natural con recebo

AUMENTO DE CAPACIDAD CON MATERIAL GRANULAR RECEBO					
	qb (kPa)	Base mejoramiento (m)	Espesor mejoramiento (m)	qu (kPa)	Aumento (%)
Material natural	372,44	1,00B	0,25	396,78	106,54%
			0,5	426,20	114,43%
			0,75	460,69	123,70%
			1	500,26	134,32%

Fuente: Elaboración propia

El incremento de capacidad de soporte del suelo natural con los diferentes espesores de recebo solo los siguientes:

- Espesor de 0.25m es de 6.54%
- Espesor de 0.50m es de 14.43%
- Espesor de 0.75m es de 23.70%
- Espesor de 1.00m es de 34.32%

Los resultados demuestran que el incremento de la capacidad de carga ultima es directamente proporcional a los cambios del espesor del recebo.

Con respecto al uso de subbase, la tendencia es similar, en el cual el incremento del espesor del material de reemplazo aumenta la capacidad de carga. Sin embargo, el empleo de subbase proporciona una mayor carga ultima y por ende mayor incremento porcentual.

Tabla 16 Ganancia capacidad de carga en el material natural con sub-base

AUMENTO DE CAPACIDAD CON MATERIAL GRANULAR SUB-BASE TIPO C					
	qb (kPa)	Base mejoramiento (m)	Espesor mejoramiento (m)	qu (kPa)	Aumento (%)
Material natural	372,44	1,00B	0,25	400,30	107,48%
			0,5	433,77	116,47%
			0,75	472,86	126,96%
			1	517,57	138,97%

Fuente: Elaboración propia

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

El incremento del uso de subbase con respecto al material natural para los diferentes espesores de remplazo son:

- Espesor de 0.25m es de 7.48%
- Espesor de 0.50m es de 16.47%
- Espesor de 0.75m es de 26.96%
- Espesor de 1.00m es de 38.97%

Los resultados, una vez más, sugieren que de la capacidad de carga admisible es directamente proporcional a los cambios del espesor.

Según lo evidenciado en las “tablas 15 y 16”, el material de sub-base tipo C es una mejor opción para aumentar la capacidad de carga ultima del suelo natural.

8.2. CAPACIDAD DE CARGA ULTIMA Y ADMISIBLE DEL SUELO SEGÚN ANALISIS POR METODO NUMERICO.

La capacidad de carga ultima y admisible del suelo natural, obtenidas mediante el programa OPTUM G2, se muestran en la “tabla 17”. Para este cálculo se manejaron unas condiciones de contorno de 10,0m de base por 5,0 m de espesor. Igualmente es importante resaltar que el factor de seguridad empleado fue $F. S=3.0$

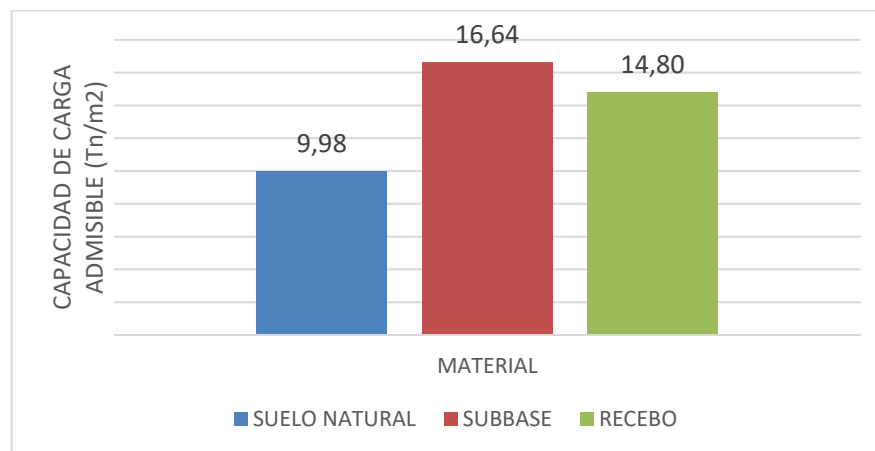
Tabla 17 Resultados de carga admisible del suelo natural

SUELO NATURAL				
BASE	ESPESOR	CARGA ULTIMA (kPa)	CARGA ULTIMA (Tn/m2)	CARGA ADMISIBLE (Tn/m2)
10,00	5,00	298,45	29,952442	9,98

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se implanto en el suelo natural las diferentes configuraciones de relleno granular tipo recebo y sub-base, según lo presentado en la matriz de remplazos “Ilustración 8”. La “ilustración 30” muestra la capacidad de carga admisible del suelo natural comparado con los valores máximos obtenidos en el suelo natural mejorado con las múltiples configuraciones del material de remplazo (espesor y ancho).

Ilustración 30 Comparación de la carga admisible entre el suelo natural y las modelaciones



Fuente: Elaboración propia

El aumento de la capacidad de carga admisible del suelo natural al ser mejorado con el material recebo tiene un aumento del 32.57%, mientras que la subbase tipo C genera un incremento de capacidad portante del 40.02% con respecto al suelo natural.

8.3. COMPARACIÓN DE LA TEORÍA DE MEYERHOF Y MODELACIONES NUMÉRICAS

Una vez realizados los cálculos de capacidad portante de las diferentes configuraciones de suelos mediante el método de Meyerhof y a través de las modelaciones numéricas con elementos finitos, es posible establecer comparativos y análisis sobre el método óptimo para usos prácticos en fundaciones.

8.3.1. Sub-base tipo C

En la “tabla 18” se presentan los resultados de capacidad de carga admisible del suelo natural con remplazo de subbase en diferentes espesores. Se evidencia que los valores de carga admisible generados por el programa de elementos finitos OPTUM G2, son más conservadores que los calculados con la teoría analítica de Meyerhof.

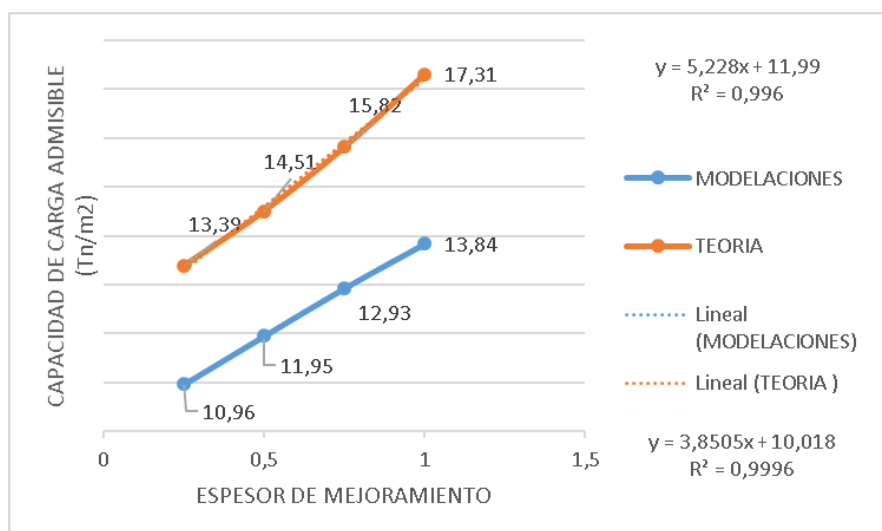
Tabla 18 Comparación de valores para sub-base tipo C

SUB-BASE TIPO C CARGA ADMISIBLE (Tn/m ²)			
BASE	ESPESOR	ELEMENTOS FINITOS	MEYERHOF
1,00	0,25	10,96	13,39
	0,5	11,95	14,51
	0,75	12,93	15,82
	1,00	13,84	17,31

Fuente: Elaboración propia

Igualmente, se observa un ligero incremento en las diferencias entre los métodos conforme se incrementa el espesor del relleno granular. Para el espesor de 0.25 m la diferencia entre el análisis por elementos finitos y el método de Meyerhof es del 18.13%, por su parte si el espesor del relleno es de 1.0 m la diferencia se incrementa al 20.02%.

Ilustración 31 Comparación de Meyerhof y modelaciones numéricas para sub-base tipo C con base 1,00B.



Fuente: Elaboración propia

De la “ilustración 31” se puede observar lo siguiente:

- Tanto la teoría de Meyerhof como el método de elementos finitos presentan un incremento en la capacidad de carga en función del creciente espesor de mejoramiento.
- La teoría de Meyerhof genera valores de capacidad admisible superiores comparados con los elementos finitos. Lo anterior podría explicarse debido a

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

las consideraciones del medio infinito que asumen las teorías analíticas, en el cual el espesor de remplazo sería aplicable a un área infinita. Por su parte los elementos finitos el remplazo con subbase está definido únicamente en un ancho de 1.0 B, por tanto, la superficie de falla se genera en suelo natural.

- El análisis de la teoría de Meyerhof y las modelaciones para el cálculo de la capacidad de carga admisible para el material de sub-base tipo C en la base de 1.00B da como resultado ecuaciones polinómicas y se verifica con valor obtenido de $R=1$.
- Para el método de la teoría de Meyerhof el valor mínimo de capacidad de carga admisible es 10.018 Tn/m², esto significa un aumento porcentual del 0.38% y para el método de las modelaciones numéricas su valor mínimo es de 11.99 Tn/m², esto significa un aumento porcentual del 16.76% del suelo natural al ser mejorado con el material sub-base tipo C, estos valores mínimos se determinan en las ecuaciones de la “ilustración 34”.

8.3.2. Recebo

En la “tabla 19” se muestra los valores obtenidos para capacidad de carga admisible por la teoría de Meyerhof y las modelaciones numéricas.

Tabla 19 Comparación de valores para recebo

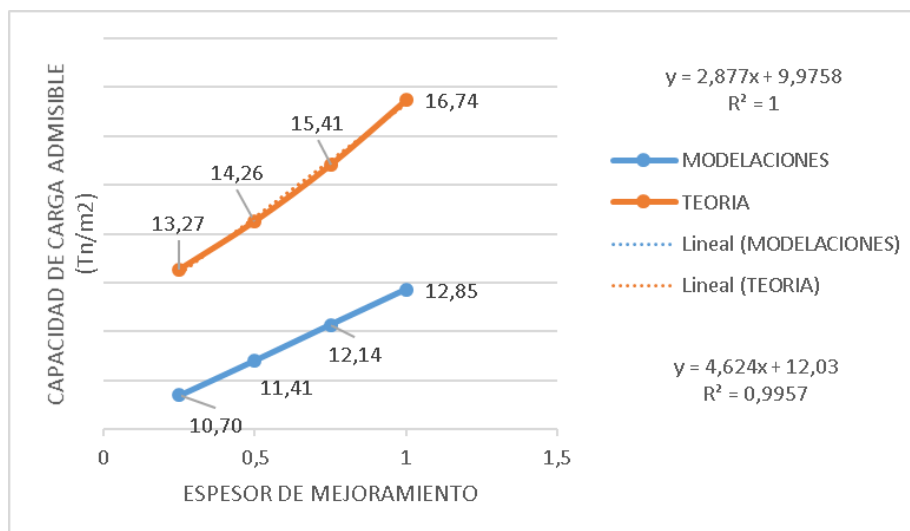
RECEBO CARGA ADMISIBLE (Tn/m ²)			
BASE	ESPESOR	ELEMENTOS FINITOS	MEYERHOF
1,00	0,25	10,70	13,27
	0,5	11,41	14,26
	0,75	12,14	15,41
	1,00	12,85	16,74

Fuente: Elaboración propia

La diferencia porcentual entre los valores de mayor capacidad de carga admisible la cual se evidencia en el ancho y espesor de mejoramiento (1,00m x 1,00m), entre las modelaciones y la teoría de Meyerhof para el material de recebo es de 23%, esto se evidencia en la “tabla 19”

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Ilustración 32 Comparación de Meyerhof y modelación numéricas para el recebo con base 1,00B



Fuente: Elaboración propia

En la “ilustración 32” se evidencia los siguiente:

- El análisis de la teoría de Meyerhof y las modelaciones para el cálculo de la capacidad de carga admisible para el material de recebo en la base de 1.00B da como resultado ecuaciones polinómicas y se verifica con valor obtenido de $R=1$.
- Para el método de la teoría de Meyerhof el valor mínimo de capacidad de carga admisible es 12.03 Tn/m², esto significa un aumento porcentual del 17.04% y para el método de las modelaciones numéricas su valor mínimo es de 9.98 Tn/m², esto significa un aumento porcentual del 0% del suelo natural al ser mejorado con el material sub-base tipo C, estos valores mínimos se determinan en las ecuaciones de la “ilustración 32”.
- Las ecuaciones presentadas tienen una variable “x” que corresponden a la variación del espesor con base de 1.00B. Esto permite conocer la capacidad de carga admisible por la teoría de Meyerhof y las modelaciones variando los valores del espesor.

Los resultados de la comparación entre la teoría de Meyerhof con respecto a las modelaciones realizadas por el programa Optum G2, evidencian:

- La capacidad de carga admisible calculada por el programa Optum G2 es más conservadora con respecto a la teoría de Meyerhof, esto se evidencia

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

en las “tablas 18 y 19” donde se muestra que la capacidad de carga mayor entregada por el programa al utilizar el material de sub-base el valor es de 13,84 kPa y para el recebo es de 12,85 kPa. La teoría de Meyerhof muestra resultados de carga admisible mejores, debido a que considera los factores de forma, inclinación y profundidad esto se evidencia en las “ilustraciones 31 y 32”.

- La teoría convencional de Meyerhof en comparación con las modelaciones solo se pueden realizar con las dimensiones de material de mejoramiento de ancho $1.00B$, debido a que la teoría de Meyerhof tiene en cuenta la base del material de mejoramiento como un medio infinito y solo se basa en las propiedades mecánicas de los materiales y sus espesores.

Nota 1: Todos los cálculos referentes a la teoría de Meyerhof de esta investigación se encuentran como documentos de consulta en el anexo 1.

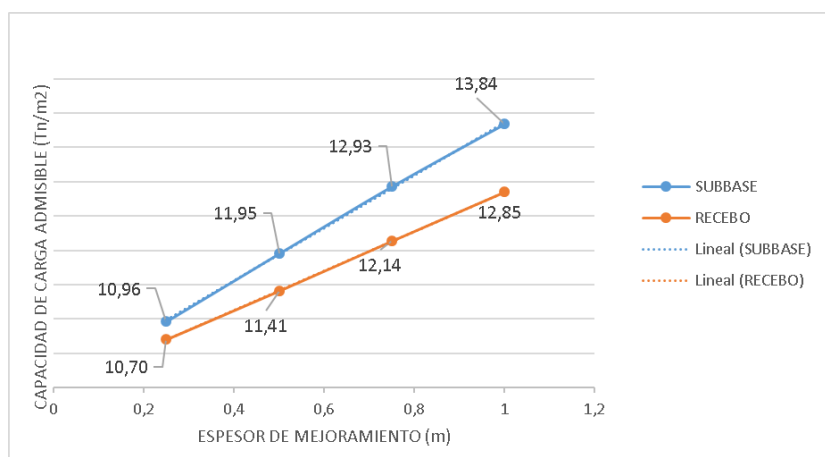
Nota 2: Todos los cálculos referentes a las modelaciones numéricas de esta investigación se encuentran como documentos de consulta en el anexo 2

8.4. INFLUENCIA DEL TIPO DE MATERIAL DE REEMPLAZO EN LA CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO MEDIANTE MODELACIONES NUMÉRICAS POR ELEMENTOS FINITOS

Mediante el programa OPTUM G2 fue posible evaluar la capacidad portante (carga admisible) del suelo empleando los dos tipos de material granular de remplazo propuestos: recebo y sub-base. El análisis fue llevado a cabo para diferentes áreas de remplazo, de sección cuadrada, definidas por su ancho proporcional a la zapata (B).

En la “ilustración 33” se presentan los valores de carga admisible del suelo de fundación con remplazos de recebo y subbase en función del espesor del mejoramiento.

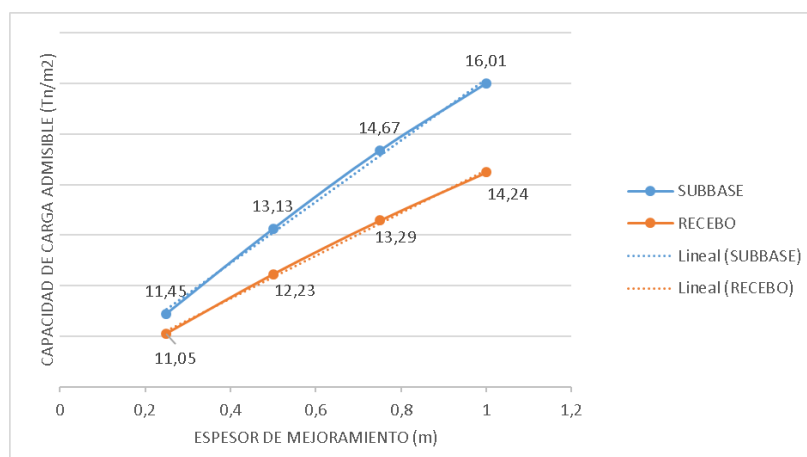
Ilustración 33 Comparación de los materiales según la base de mejoramiento 1.00B



Fuente: Elaboración propia

A partir de la “ilustración 33” es claro que el relleno granular subbase proporciona mayores capacidades de carga que el recebo en todos los espesores de remplazo estudiado. A su vez se evidencia que los incrementos de capacidad portante en función del espesor del remplazo son más significativos en la subbase tipo C. Este material incrementa la carga admisible a razón de 7.5% por cada 25 centímetros de remplazo, por su parte el recebo incrementa a razón de 5.9% por cada 25 centímetros.

Ilustración 34 Comparación de los materiales según la base de mejoramiento 1.50B



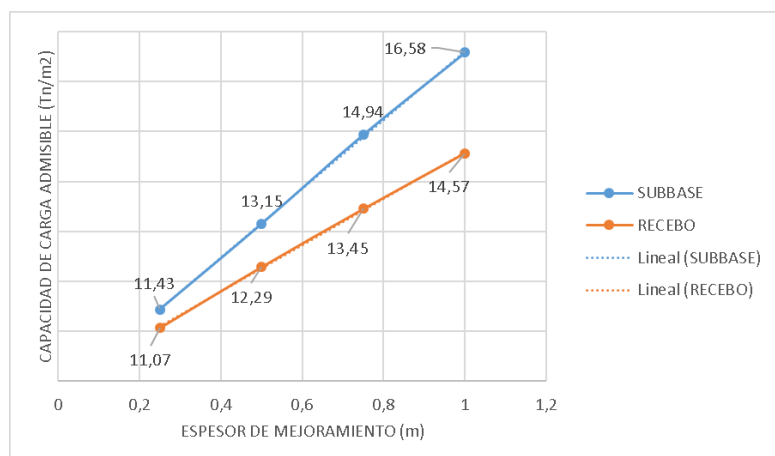
Fuente: Elaboración propia

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Para la “ilustración 34” se analiza:

- Los materiales de mejoramiento propuestos cuentan con ecuaciones lineales y su aumento porcentual de la capacidad de carga admisible con variación del espesor cada 0.25m de la sub-base tipo C es del 10.6%, y para el recebo es a razón del 8.1%.

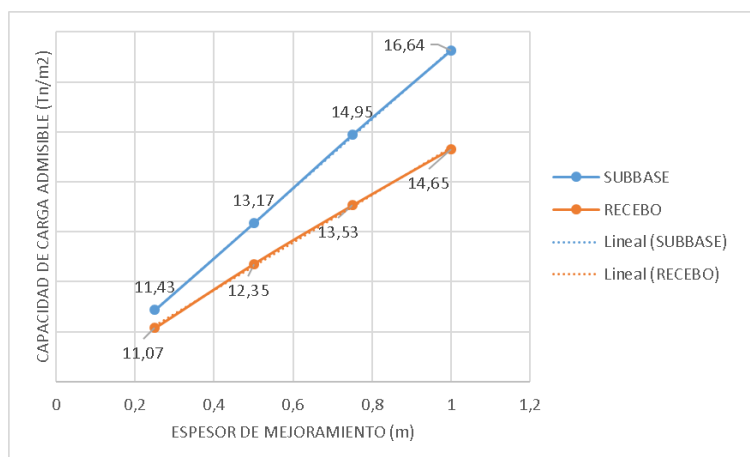
Ilustración 35 Comparación de los materiales según la base de mejoramiento 2.00B



Fuente: Elaboración propia

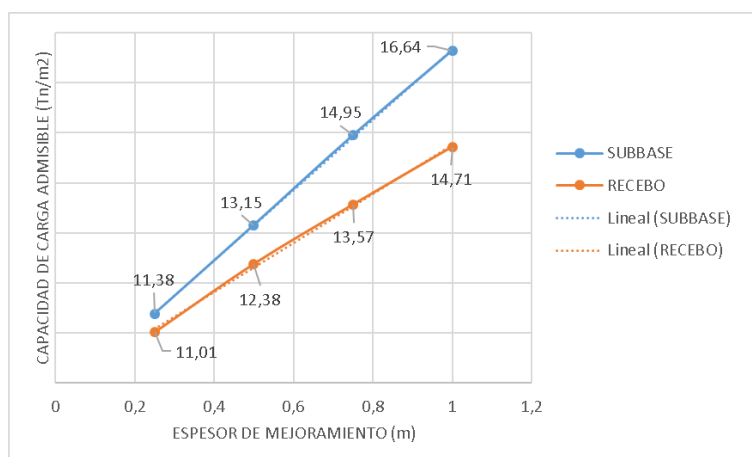
El material sub-base tipo C y el recebo tipo INVIAS presentan una línea de tendencia lineal, como se evidencia en la “ilustración 35” el material de sub-base tipo C tienen mayores valores de capacidad de carga admisible.

Ilustración 36 Comparación de los materiales según la base de mejoramiento 2.50B



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 37 Comparación de los materiales según la base de mejoramiento 3.00B

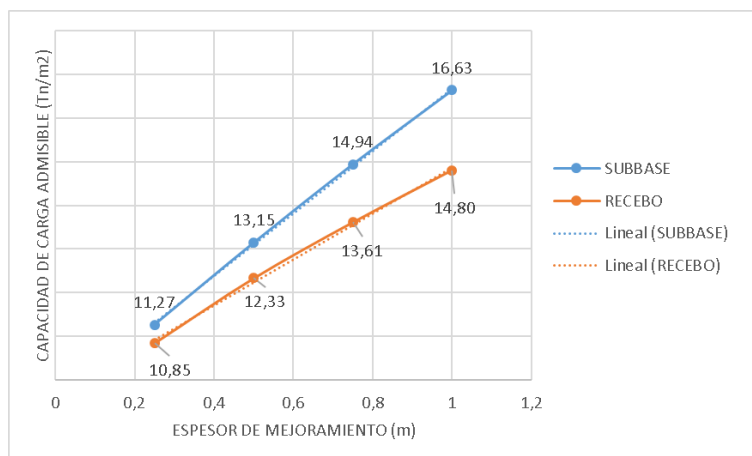


Fuente: Elaboración propia

Para las “ilustraciones 36 y 37” se evidencia

- Los materiales de mejoramiento propuestos para ambas ilustraciones cuentan con ecuaciones lineales, su aumento porcentual de la capacidad de carga admisible con variación del espesor cada 0.25m de la sub-base tipo C para ambas graficas es del 11.8%, y para el recebo es a razón del 9.1%.

Ilustración 38 Comparación de los materiales según la base de mejoramiento 3.50B



Fuente: Elaboración propia

En la “ilustración 38” se analiza:

- Los materiales de sub-base tipo C y recebo cuentan con una línea de tendencia lineal según su valor de $R=1$.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

- Los valores máximos de capacidad de carga admisible obtenidos en el espesor de 1.00m que cuentan cada uno de los materiales de reemplazo tienen una diferencia porcentual del 11% donde la sub-base ofrece mejores valores a la hora de ser utilizado en el suelo natural.

Para las “ilustraciones 35-36-37-38”, se evidencia en los cálculos de capacidad de carga admisible, el aumento de la base de mejoramiento después de 2.50B no es representativo, ya que los valores no tienen un aumento porcentual mayor al 2% con respecto al suelo natural, es decir solo aumentaría el volumen del material, pero no la capacidad de carga admisible.

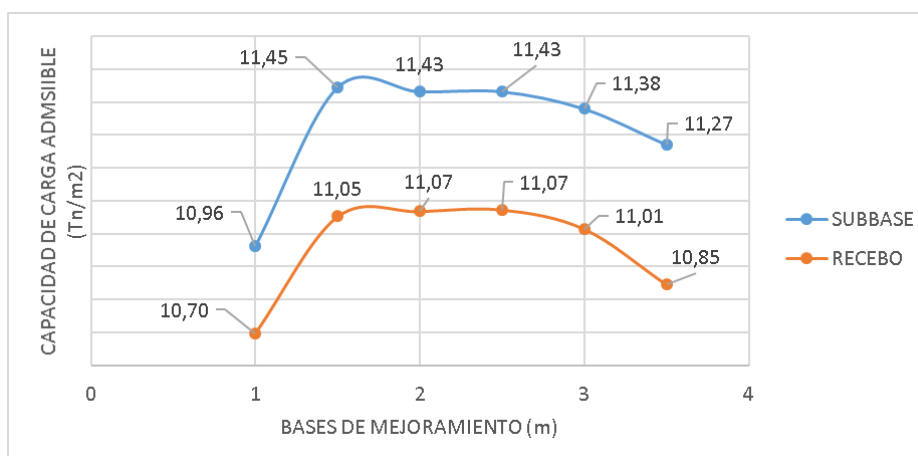
Nota 3: Todos los cálculos referentes a las modelaciones numéricas de esta investigación se encuentran como documentos de consulta en el anexo 2

8.5. INFLUENCIA DEL AREA DEL MEJORAMIENTO EN LA CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO MEDIANTE MODELACIONES NUMERICAS CON ELEMENTOS FINITOS

El programa de elementos finitos OPTUM G2 permite variar el ancho de la sección cuadrada del relleno granular. De esta forma es posible evaluar el ancho óptimo de la sección de remplazo, que genera el mayor incremento en la carga admisible del suelo de fundación.

La “ilustración 39” presenta la carga admisible del suelo con un remplazo de recebo y subbase de espesor de 0.25 metros en función del ancho de la base de mejoramiento. Las “ilustraciones 40 - 41 Y 42” corresponden a los espesores 0.50, 0.75 y 1.0 m respectivamente.

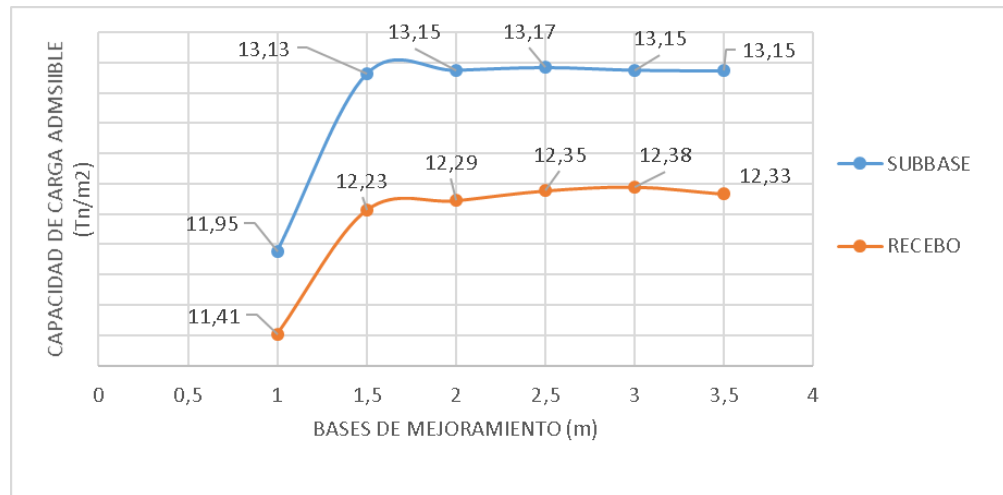
Ilustración 39 Espesor 0.25m



Fuente: Elaboración propia

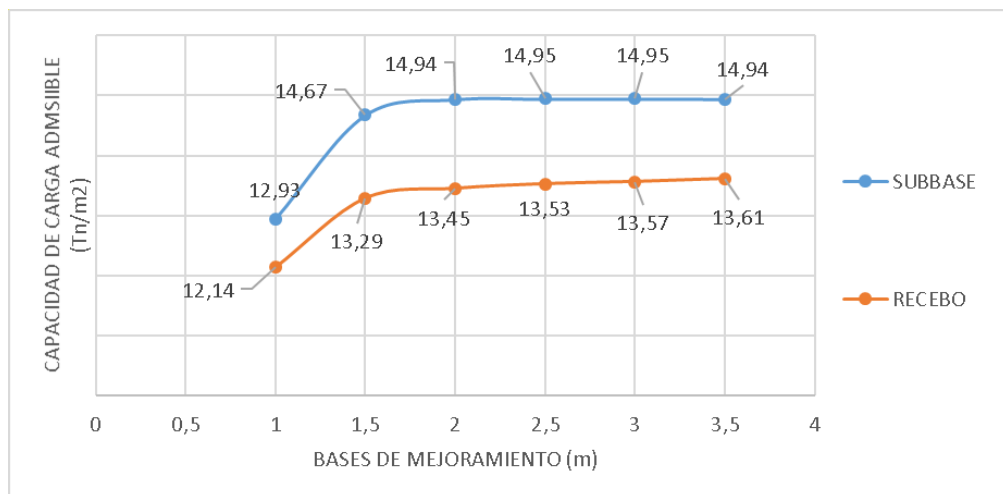


Ilustración 40 Espesor 0.50m



Fuente: Elaboración propia

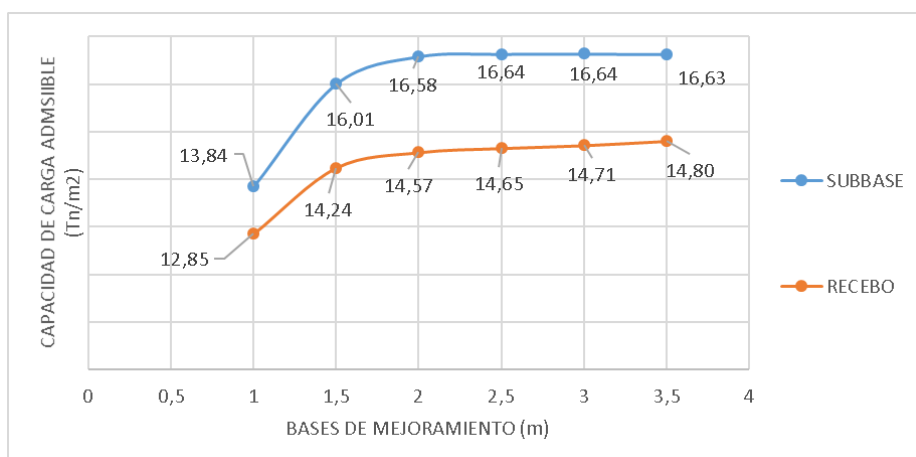
Ilustración 41 Espesor 0.75m



Fuente: Elaboración propia

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Ilustración 42 Espesor 1.00m



Fuente: Elaboración propia

De las “ilustraciones 39 a la 42” se pueden realizar las siguientes observaciones:

- Los valores de carga admisible son mayores cuando se utiliza la subbase tipo C en vez del recebo. Sin embargo, la tendencia de aumento de capacidad de carga es similar para ambos tipos de material de reemplazo. Se presenta un incremento significativo de la capacidad pórtae al incrementar el ancho de la base del reemplazo de 1.0 B a máximo 2.0 B. Reemplazos con anchos superiores a 2.0 B presentan un comportamiento asintótico con incrementos en capacidad de carga de poca importancia.
- Es posible sugerir que reemplazos del suelo natural con rellenos granulares en un ancho equivalente a dos veces la base de la cimentación representa condiciones similares al medio continuo, teniendo en cuenta que anchos mayores no generan incrementos significativos en la capacidad de carga.
- Se evidencia en las “ilustraciones 39 a la 42”, para los valores 1.0B a 1.5B como base de mejoramiento para todos los espesores propuestos un aumento significativo promedio del 8.36%, sin embargo al ir aumentando las bases de mejoramiento el valor de capacidad de carga admisible su incremento no es significativo debido a que su cambio porcentual es del 0.01%, por tal razón se comprueba la teoría de Meyerhof donde asume la base como un medio infinito. Este comportamiento se presentan en ambos materiales de reemplazo.
- Se evidencia una variacion en los valores de la sub-base tipo C con respecto al recebo, el cual da entender que la subbase soporta una mayor carga, con una capacidad maxima de carga admsiible de 16.64 Tn/m2.

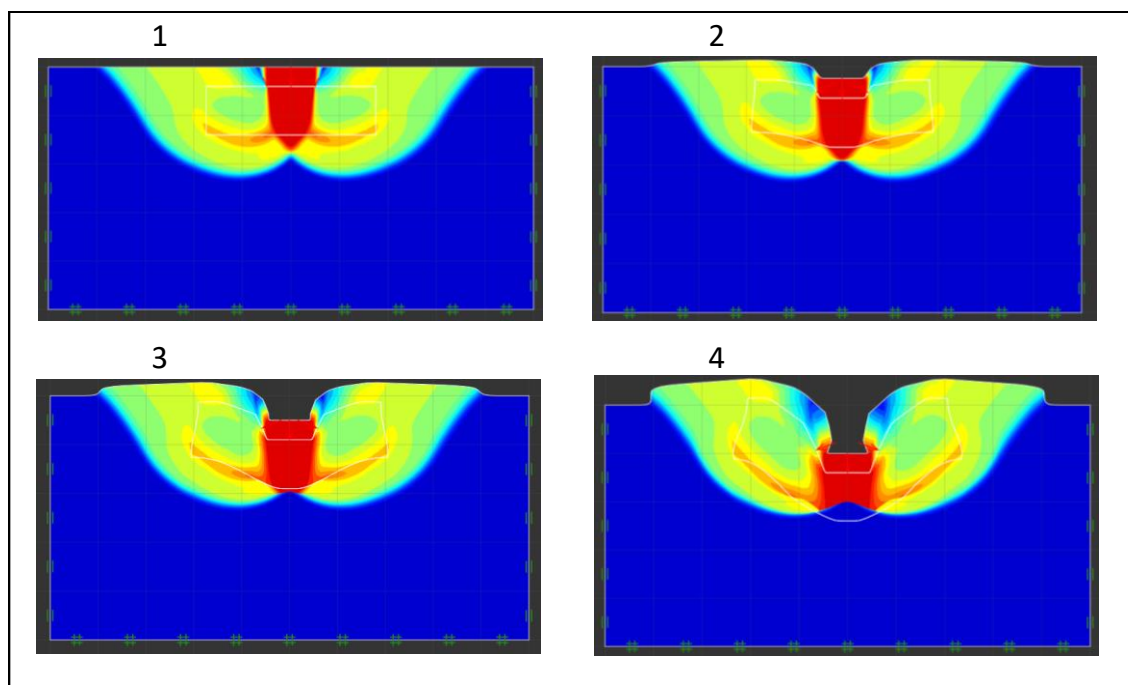
 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

Nota 4: Todos los cálculos referentes a las modelaciones numéricas de esta investigación se encuentran como documentos de consulta en el anexo 2

8.6. DESPLAZAMIENTO DEL SUELO POR MEDIO DE LAS MODELACIONES

En la “ilustración 43” se muestra el comportamiento de falla del suelo natural con el material de mejoramiento recebo, donde se aprecia el desplazamiento que tiene el material granular al ser sometido a una carga máxima de 448.4 kPa, mediante el análisis de los elementos Upper.

*Ilustración 43 Comportamiento de falla del recebo (3.50B * 1.00)*

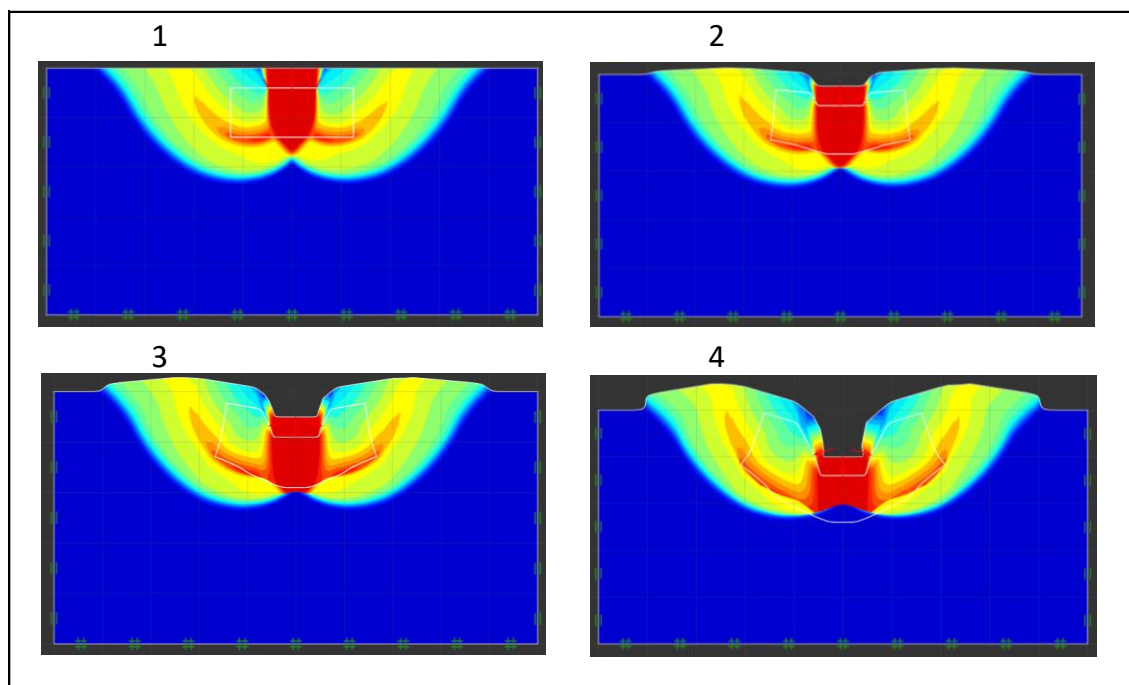


Fuente: Optum G2

En la “ilustración 43” se muestra los desplazamientos totales, donde se evidencia el cambio del material con respecto a la carga.

En la “ilustración 44” se evidencia el comportamiento de falla del suelo natural con el material de mejoramiento subbase tipo C, donde se aprecia el desplazamiento que tiene el material granular al ser sometido a una carga máxima de 503.8 kPa, mediante el análisis de los elementos Upper.

*Ilustración 44 Comportamiento de falla de la sub-base (2.50B *1.00)*



Fuente: Optum G2

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos en este trabajo investigativo y la información suministrada en la revisión bibliográfica, se puede concluir que:

- El material idóneo como componente de reemplazo según los propuestos como material de mejoramiento a soportar la carga de las cimentaciones superficiales es la sub-base tipo C, debido al aumento de la capacidad de carga admisible del suelo natural en comparación con el suelo natural mejorado con sub-base tipo C, es del 40.02% este aumento se presenta en la configuración de ancho de mejoramiento 2.5B y espesor 1.0 m.
- Los valores de capacidad de carga admisible son mayores para el material sub-base tipo c, sin embargo, el recebo con la configuración de 3.5B ancho de mejoramiento y con 1.0m de espesor, aporta un 32.57% en la capacidad de carga del suelo natural.
- En comparación de los resultados de capacidad de cargas admisibles de la teoría de meyerhof y las modelaciones numéricas, se puede decir que diseñar con el programa Optum G2 es más conservador, debido a que tiene en cuenta las condiciones de contorno o fronteras del suelo, en ancho y espesor del relleno .
- Con los cálculos obtenidos en las modelaciones numéricas, se comprueba que la teoría de Meyerhof de una base infinita se alcanza con remplazos de base 2.0Bm y espesores mayores a 0.25m. Incrementos en el ancho del remplazo superiores a 2.0B no generan incrementos significativos en la capacidad de carga del suelo. La capacidad de carga del suelo natural incrementa de forma proporcional al aumento del espesor del relleno granular.
- La técnica de reemplazo de material por uno de mejores características mecánicas se considera como viable para el desarrollo de obras de infraestructura que requiera cimentaciones superficiales con suelos blandos.
- La sub-base tipo c es un material que cuenta con mejores características mecánicas (cohesión, ángulo de fricción y peso específicos) y para efectos de esta investigación con mayor soporte de carga respecto al recebo, lo cual, puede ser tomando a consideración como material de mejoramiento, ya que genera un aumento en la capacidad de carga admisible para suelos blandos.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

RECOMENDACIONES

Con las conclusiones vistas y los resultados obtenidos con el programa Optum G2, es importante aclarar las siguientes recomendaciones para una futura investigación en el mejoramiento de un suelo blando:

- Es importante realizar los ensayos de laboratorio para obtener mejores resultados, los cuales son requeridos a la hora de realizar las modelaciones, en la ciudad de Bogotá, se encuentra pocos lugares con la maquinaria adecuada para realizar los ensayos de corte directo y límites de Atterberg para un material granular de gran tamaño, los ensayos tienen costos elevados y poca disponibilidad.
- Se recomienda utilizar otro tipo de material granular como la sub-base tipo C con adición de geotextil o recebo con complemento de caucho, que presentan características similares a las empleadas en este trabajo investigativo, con el fin de tener un rango más amplio de elección a la hora de ser ejecutada la construcción.
- Se recomienda realizar este mismo estudio con otros programas geotécnicos tales como loadcap o geotechnical and F.E.M Analysis system, para así comparar y validar los resultados que se dieron en esta investigación.
- Se recomienda hacer un análisis por elementos discretos el cual tenga en cuenta el tamaño de las partículas, y así validar si las capacidades de carga admisibles se mantienen dentro del rango admisible o existe algún tipo de variación.
- Es recomendable hacer estas mismas configuraciones en el programa Optum G2, determinando los tipos de análisis de elementos mediante los 6 nodos de Gauss o los 15 nodos de Gauss, ya que el programa lo permite, para así validar si existe algún cambio en los resultados de capacidad de carga admisible.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

BIBLIOGRAFÍA

- Alfonso Uribe S. Y Cia Y Ltda. (2006). *Estudio De Suelos Y Análisis De Cimentaciones Puentes Vehiculares (Pontones) Sobre El Canalar De Salitre Y El Rio Juan Amarillo A Acceso Al Barrio Lisboa Localidad De Suba-bogota D.C.* Bogota D.C: Alcaldía De Bogotá.
- Alarcón Álvarez, E., & Fraile De Lerma, A. (2011). *Mecánica De Medios Continuos Y Teoría De Estructuras*. Madrid, España : Silva Suárez, Manuel.
- Construshop. (14 De 03 De 2019). Obtenido De <https://www.construshop.com.co/producto/recebo-o-afirmado-arena/>
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos De Ingeniería Geotécnica*. En B. M. Das. Mexico: Cengage Learning Editores S.A.
- Díaz, F. J., Ordóñez, I. M., Rodríguez, G. A., & Beltrán, A. L. (Octubre 2010). *Zonificación De La Respuesta Sísmica De Bogotá Para El Diseño Sismorresistente De Edificaciones*. Bogota Dc.
- Hanna, A. M. 1987. "Finite Element Analysis of Footings on Layered Soils." *Mathematical Modelling* 9 (11): 813–19. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90501-X](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90501-X).
- Hanna, A.M. 1982. "Bearing Capacity of Foundations on a Weak Sand Layer Overlying a Strong Deposit." *Can Geotech J* V 19 (N 3): 392–96. <https://doi.org/10.1139/t82-043>.
- Hanna, A.M., and G.G. Meyerhof. 1980. "Design Charts for Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Sand Overlying Soft Clay." *Canadian Geotechnical Journal* 17 (2): 300–303. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Invias. (2013). *Base Granular*.
- Invias. (2013). *Recebo*.
- Krabbenhoft, K., Lyman, A., & Krabbenhoft, J. (2016). *Optum G2 Theory* . Copenhagen - Dinamarca : Optum Computational Engineering.
- Légorreta Cuevas, H., López Rincon, G., & Rivera Constantino, R. (2018). *Capacidad De Carga En Suelos*. México: Universidad Nacional Autonoma De Mexico.
- Ltda, A. U. (S.F.). *Estudio De Suelos Y Análisis De Cimentaciones Puentes Vehiculares (Pontones) Sobre El Canal De Salitre Y El Rio Juan Amarillo A Acceso Al Barrio Lisboa Localidad De Suba-bogota Dc*.
- Maldonado Perez, A. G. (S.F.). *Scribd - Teoria De Consolidacion* . Recuperado El 18 De Marzo De 2020, De <https://es.scribd.com/document/399013775/Teoria-de-consolidacion>
- Medina Mendoza, J. (16 De Abril De 2020). *De Buenos Cimientos*. Obtenido De <http://www.imcyc.com/cyt/febrero02/buenos.htm>
- Mehdi Mansouria, M. I. (2019). *Ultimate Bearing Capacity Of Rock Masses Under Square And Rectangular Footings*. Sciencedirect.
- Merchan Infante, S. D. (2009). *Comportamiento De Suelos Expansivos En Cimentaciones Superficiales*. Bogotá: Universidad De Los Andes.
- Meyerhof, G.G. 1974. "Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlaying Clay." *Canadian Geotechnical Journal* 1: 223–29.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	--

- Meyerhof, G., & Hanna, A. (1978). Ultimate Bearing Capacity Of Foundations On Layered Soils Under Inclined Load” De Los Autores “G.G. Meyerhof Y Abel Hanna. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Ministerio De Ambiente Y Vivienda Y Desarrollo Territorial, R. C. (2014). Nsr-10. Colombia : Ministerio De Ambiente Y Vivienda Y Desarrollo Territorial.
- Montoya Suarez, G. I. (2013). *Parámetros De Resistencia Al Corte En La Interfaz Suelo Concreto*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Optum. (23 De 04 De 2019). Obtenido De [Https://Optumce.Com/Products/Optumg2](https://Optumce.Com/Products/Optumg2)
- Pérez Valcárcel, J. (S.F.). *Mejora Y Consolidación De Suelos*. Recuperado El 18 De Marzo De 2020, De [Https://Www.Udc.Es/Dep/Dtcon/Estructuras/Etsac/Profesores/Valcarcel/Maternrhe-0809/6-mejora%20suelos.Pdf](https://Www.Udc.Es/Dep/Dtcon/Estructuras/Etsac/Profesores/Valcarcel/Maternrhe-0809/6-mejora%20suelos.Pdf)
- Reimbert, M. Y. (1978). *Presiones Y Asentamientos De Las Cimentaciones Superficiales*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados S.A.
- Saputra, D. (2018). *Analisis Numerik Jarak Interaksi Antara Dua Buah Pondasi Dangkal Menerus Pada Tanah Lempung*. Bandung, Indonesia : Universitas Katolik Parahyangan.
- Shoaei, M. Dalili, A. Alkarni, J. Noorzaei, M. S. Jaafar, and Bujang B.K. Huat. 2012. “Review of Available Approaches for Ultimate Bearing Capacity of Two-Layered Soils.” *Journal of Civil Engineering and Management* 18 (4): 469–82. <https://doi.org/10.3846/13923730.2012.699930>.
- Sitharam, P. (2013). Advanced Foundation. Bangalore.
- Suarez Diaz, J. (Junio 1998). *Deslizamientos Y Estabilidad De Taludes En Zonas Tropicales*. Bucaramanga, Colombia : Ingenieria De Suelos Ltda.
- Universidad Carlos Iii De Madrid. (23 De 04 De 2019). Obtenido De [Http://Ocw.Uc3m.Es/Mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/Ingenieria-estructural/Material-de-clase-1/Apuntes/Capitulo_9.-introduccion_al_metodo_de_los_elementos_finitos.Pdf](http://Ocw.Uc3m.Es/Mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/Ingenieria-estructural/Material-de-clase-1/Apuntes/Capitulo_9.-introduccion_al_metodo_de_los_elementos_finitos.Pdf)
- Villadiego Estrada, M. (12 Diciembre De 2018). *Modelación Con Diferencias Finitas Del Comportamiento Dinámico De Suelo Estratificados Sometidos A Cargas En Superficies Casa 2d*. Bogotá: Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito.
- Villadiego Estrada, M. (2018). *Modelación Con Diferencias Finitas Del Comportamiento Dinámico De Suelos Estratificados Sometidos A Cargas En Superficies Casa 2d*. Bogotá: Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito.
- Villalaz, C. (2008). *Mecanica De Suelos Y Cimentaciones* . México D.F: Limusa S.A .
- Villalaz, C. (2008). *Mecanica De Suelos Y Cimentaciones*. En C. Villalaz. México: Limusa S.A.
- Web, G. (03 De Abril De 2020). *Geología, Ramas Y Aplicaciones* . Obtenido De [Https://Geologiaweb.Com/Ingenieria-geologica/Cimentaciones-superficiales/](https://Geologiaweb.Com/Ingenieria-geologica/Cimentaciones-superficiales/)

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS BLANDOS AL IMPLEMENTAR RELLENOS GRANULARES COMO TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	FECHA: ENERO 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

ANEXOS

Anexo 1

Resultados de carga admisible mediante la teoría de Meyerhof

Anexo 2

Resultados de carga admisible mediante la modelación numérica